



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

PIIA LINNAINMAA  
NOSTURIN LUOTETTAVUUDEN VARMISTAMINEN ERILAISISSA  
YMPÄRISTÖOLOSUHTEISSA

Diplomityö

Tarkastaja: Associate professor Minnamari Vippola

Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Automaatio-, kone- ja materiaalitekniikan tiedekuntaneuvoston kokouksessa 4. kesäkuuta 2014

## TIIVISTELMÄ

**LINNAINMAA, PIIA:** Nosturin luotettavuuden varmistaminen erilaisissa ympäristöolosuhteissa

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 88 sivua, 4 liitesivua

Elokuu 2014

Materiaalitekniikan koulutusohjelma

Pääaine: Metallimateriaalit

Tarkastaja: Associate professor Minnamari Vippola

Avainsanat: nosturi, luotettavuuden varmistus, analysointimenetelmät, olosuhdetestaus, ympäristöolosuhteet

Tämän työn tavoitteena on tarkastella ympäristöolosuhteiden vaikutuksia standardi- ja prosessinosturien komponentteihin luotettavuustekniikan keinoin. Työssä käsitellään niin mekaanisten kuin sähköisten komponenttien vikaantumista. Tarkastelu painotetaan sähkölaitteisiin ja -komponentteihin, sillä niihin liittyvät sovellukset ovat suhteellisen uusia nostureissa eikä niiden vikaantuminen ole yhtä hyvin tunnettua kuin mekaanisten osien.

Luotettavuuden varmistusmenetelmät voidaan jakaa analysointimenetelmiin ja testaukseen. Näitä voidaan käyttää joko erikseen tai tukemaan toisiaan. Analysointimenetelmiä pyritään usein hyödyntämään ensin, joka mahdollistaa testauksen kohdistamisen oikeisiin tekijöihin. Tässä työssä on esitetty kolme analysointimenetelmää ja kuvattu niiden soveltuvuus erilaisiin tilanteisiin. Lisäksi olosuhdetestausstandardit ympäristöolosuhteiden määrittämiselle ja erilaisten ympäristöolosuhteiden testaukselle on listattu. Kirjallisuustutkimuksen perusteella on laadittu luotettavuuden varmistusprosessi. Lopuksi on hyödynnetty parhaiten soveltuvaa luotettavuuden analysointimenetelmää kahdelle esimerkkilaitteelle ja laadittu tämän perusteella testisuunnitelma näiden olosuhdetestaukselle.

Esimerkkilaitteina on kaksi erilaista sähkölaitetta: kunnonvalvontalaite 1 ja 2. Analysointimenetelmän hyödyntämisen lähtökohtana on kartoittaa vikaantumisen kannalta olennaiset rasitustekijät laitteiden käyttöympäristössä. Tarkastelu on tehty komponenttinäkökulmasta, joka ei ota kantaa komponenttien keskinäisiin suhteisiin tai sijoitteluun piirilevyllä. Näkökulma ei kata täysin kaikkia vikaantumismahdollisuuksia, mutta mahdollistaa tulosten karkean yleistämisen vastaavista komponenteista koostuviin laitteisiin. Tulosten perusteella merkittävimmit rasitustekijöiksi sähkölaitteiden vikaantumisen kannalta nousivat lämpötila, kosteus, jännite ja mekaaniset rasitukset.

Luotettavuuden varmistusprosessia voidaan soveltaa mille tahansa laitteelle tai komponentille. Kunnonvalvontalaitteille tehdyn luotettavuuden arvioinnin tuloksia voidaan sen sijaan soveltaa ainoastaan karkealla tasolla muille vastaaville laitteille, jotka altistuvat samoille olosuhteille. Olosuhdetestisarjat laadittiin standardoituja menetelmiä käyttäen. Lisätutkimus tulisi suunnata yhdistelmätestaukseen, jossa näyte altistetaan usealle rasitustekijälle samanaikaisesti. Tämä mahdollistaisi sekä ajallisen säästön että käyttöolosuhteita todennäköisesti paremmin kuvaavat rasitusolosuhteet. Tällaiselle yhdistelmätestaukselle ei kuitenkaan ole tällä hetkellä saatavilla standardoituja testimenetelmiä. Esimerkkien vähäisyys tekee luotettavuuden varmistamismenetelmien soveltamisen ja testaussarjojen laatimisen haasteelliseksi. Luotettavuuden varmistaminen on koko ajan yleisempää, mutta tulosten julkaisu on harvinaista, sillä mahdolliset puutteet tuotteiden luotettavuudessa halutaan pitää yritysten sisäisenä tietona.

## ABSTRACT

**LINNAINMAA, PIIA:** Ensuring crane reliability under various environmental conditions

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 88 pages, 4 Appendix pages

August 2014

Master's Degree Programme in Material's Technology

Major: Metals

Examiner: Associate professor Minnamari Vippola

Keywords: crane, reliability engineering, analysis methods, environmental testing, environmental effects

The purpose of this study is to review environmental effects on standard and process crane components. This is done by utilizing different tools of reliability engineering. Study covers the failure of mechanical and electrical components. The focus is however on electrical components and parts since they can be considered as a new technology in the crane applications. The failure of mechanical components is on the contrary well known.

Typically reliability ensuring is done using different analysis or testing methods. These can be utilized separately or to support each other. Analysis methods are often used first so that the testing can be focused on right factors. In this study three different analysis methods are introduced and their suitability for different situations is presented. Environmental testing standards are also introduced for determining ambient conditions and testing of different environmental factors. A reliability ensuring process based on literature survey is constructed and applied to two different condition monitoring equipment. The most suitable analysis method is first used to determine environmental factors for testing and then a test series for environmental testing is established.

Condition monitoring equipment 1 and 2 are both electric devices. Analysis method is utilized to identify essential environmental factor in ambient condition that can cause failure. The study is done from the components' point of view. This does not take account interrelations between different components and their layout on printed circuit board. The standpoint does not cover all possible failures, but enables rough generalization of the results to the devices that is composed of corresponding components. According to the results, the main environmental stress factors that can cause a failure of electric device are temperature, humidity, voltage and mechanical stress.

The reliability ensuring process is applicable to any device or component. The reliability analysis results of condition monitoring devices can in turn be utilized only on rough level to similar devices with similar ambient conditions. Further research should aim to combined testing where test samples are exposed several environmental factors simultaneously. Combined testing provides shorter testing time and testing conditions that likely correspond better to ambient conditions. However there is no standard methods available for this kind of combined testing. Lack of examples makes it challenging to utilize reliability evaluation methods and creation of test series. Reliability ensuring is a common action in everyday life in business world. However, results are rarely published since the possible lack of reliability in a product is wanted to keep confidential.

## ALKUSANAT

Tämä työ tehtiin halusta laajentaa nosturisovellusten luotettavuuden varmistus ympäristön rasitusolosuhteisiin. Työ oli kaiken kaikkiaan hyvin monipuolinen. Olen saanut oppia uutta ja haastaa itseäni pois mukavuusalueeltani. Erityisesti olen oppinut paljon luotettavuustekniikasta ja elektroniikkakomponenttien vikaantumisesta viimeisen reilun puolen vuoden aikana.

Suuri kiitos työni valmistumisesta kuuluu ohjaajilleni Kirsi Saarinen-Pullille ja Juha Suniolle. Olen saanut heiltä korvaamatonta ohjausta koko tutkimus- ja kirjoitusprosessin ajan. Kiitos kuuluu myös Aapo Jantuselle ja Ari Väisäselle, joilta sain tärkeää tietoa kunnonvalvontalaitteista. Lisäksi kiitos kuuluu koko muulle tuotekehityksen väelle, joilta on löytynyt aina aikaa kysymyksilleni. Haluan myös kiittää Minnamari Vippolaa työni tarkastamisesta.

Haluan kiittää avopuolisoani, Karia, tuesta ja ymmärryksestä niin opiskelujen kuin itse diplomityön aikana. Olen kiitollinen siitä, että ruokahuolto on pelannut ja kaapista löytynyt puhtaita astioita kiireisimpinäkin aikoina. Lisäksi haluan kiittää perhettäni ja ystäviäni kannustuksesta ja aivojen tuulettamisesta aina tarvittaessa.

Tampereella, 18.10.2014

Piia Linnainmaa

# SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO .....	1
2	NOSTURIN KÄYTTÖ JA MATERIAALIT .....	4
2.1	Nosturi.....	4
2.2	Nosturissa käytettävät materiaalit .....	5
2.2.1	Metallit ja pinnan viimeistely .....	6
2.2.2	Muovit ja kumit.....	8
2.3	Käyttöympäristöt.....	9
3	RASITUSTEKIJÄT .....	12
3.1	Ilmastolliset rasitustekijät.....	13
3.1.1	Lämpötila .....	14
3.1.2	Kosteus.....	15
3.1.3	Ilman epäpuhtaudet .....	16
3.1.4	UV -säteily .....	17
3.2	Dynaamiset rasitustekijät .....	17
3.2.1	Vaikutukset materiaaliin .....	17
3.2.2	Mekaaninen kuorma.....	19
3.2.3	Isku, värinä ja kiihtyvyys .....	20
3.2.4	Virta, jännite ja teho.....	21
3.3	Rasitustekijöiden yhteisvaikutukset .....	23
3.4	Vikaantuminen .....	24
4	LUOTETTAVUUDEN VARMISTUSMENETELMÄT .....	29
4.1	Luotettavuus ja sen varmistaminen .....	29
4.2	Testaus.....	33
4.2.1	Lämpötestit.....	40
4.2.2	Kosteustestit .....	42
4.2.3	Korroosiotestit.....	43
4.2.4	Dynaaminen olosuhdetestaus .....	45
4.2.5	Yhdistelmätestaus .....	46
4.3	Analysointimenetelmät.....	50
4.3.1	Vika- ja vaikutusanalyysi, FMEA.....	54
4.3.2	Vikapuuanalyysi, FTA .....	56
4.3.3	Tapahtumapuuanalyysi, ETA.....	58
4.4	Luotettavuustestauksen ja -analysoinnin rajoitteet .....	60
5	LUOTETTAVUUDEN VARMISTUS KÄYTÄNNÖN SOVELLUKSISSA .....	62
5.1	Mekaaniset komponentit .....	64
5.2	Elektroniikkakomponentit.....	65
5.2.1	Kunnonvalvontalaite 1 .....	66
5.2.2	Kunnonvalvontalaite 2 .....	76
6	YHTEENVETO .....	79
	LÄHTEET.....	83

LIITE 1.....	89
LIITE 2.....	90
LIITE 3.....	91

## KUVALUETTELO

<b>Kuva 1.</b>	<i>Tyypillisen yksipääkannattajaisen siltanosturin rakenne. (China Mine Cranes Co.Ltd 2014).....</i>	<i>4</i>
<b>Kuva 2.</b>	<i>Työpistenosturien mahdollisia rakenteita: a) kevytnosturijärjestelmä, b) pylväsnosturi ja c) yksikiskoratanosturi. (Finnlift 2014).....</i>	<i>5</i>
<b>Kuva 3.</b>	<i>Jännitys-lujuus -jakaumat erillään, jolloin vikaantumista ei tapahdu. Jännitys-jakauma (Load, L) on kuvassa vasemmalla ja lujuusjakauma (Strength, S) oikealla. (O' Connor &amp; Kleyner 2012).....</i>	<i>26</i>
<b>Kuva 4.</b>	<i>Jännitys-lujuus -jakaumat limittäin: vikaantuminen on mahdollinen viivoitetun pinta-alan olosuhteissa (O' Connor &amp; Kleyner 2012).....</i>	<i>26</i>
<b>Kuva 5.</b>	<i>Lujuuden muutos ajan funktiona (O' Connor &amp; Kleyner 2012) .....</i>	<i>27</i>
<b>Kuva 6.</b>	<i>Vikaantumisen kylpyammekäyrä vaihdettavalle komponentille tai systeemille (Cristaldi et al. 2011) .....</i>	<i>27</i>
<b>Kuva 7.</b>	<i>Kumulatiivinen vikaantumisfunktio (ylhäällä) kertoo todennäköisyyden, että vikaantuminen tapahtuu tiettyyn ajan hetkeen mennessä, kun taas vikaantumisfunktio (alhaalla) kertoo hetkellisen vikaantumisen todennäköisyyden. (Cristaldi et al. 2011) .....</i>	<i>31</i>
<b>Kuva 8.</b>	<i>Olosuhdetestaus tuotteen elinkaarella: OK viittaa tilanteeseen, jossa siirrytään hyväksytysti seuraavaan vaiheeseen, kun taas NG viittaa tilanteeseen, jossa joudutaan palaamaan johonkin edeltävään vaiheeseen. (Espec Technology Report No1 1996).....</i>	<i>33</i>
<b>Kuva 9.</b>	<i>Olosuhdetestauksen jako mekaaniseen, ilmastolliseen sekä näiden yhdistelmien testaukseen. (Espec Technology report No. 1, 1996).....</i>	<i>38</i>
<b>Kuva 10.</b>	<i>Yhdistelmätestauksen tulosten laajuus (Espec Technology Report No. 4 1997).....</i>	<i>46</i>
<b>Kuva 11.</b>	<i>Yhdistelmätestauksen rasitukset luonnollisessa ja keinotekoisessa ympäristössä (Espec Technology Report No. 3 1997) .....</i>	<i>47</i>
<b>Kuva 12.</b>	<i>CERT -testauksessa tyypillinen jännitysprofiili auto- ja ilmailuteollisuudessa käytettäville sähkökomponenteille (O' Connor 2001).....</i>	<i>48</i>
<b>Kuva 13.</b>	<i>Esimerkki komponenttien ympäristötestisarjasta (Espec Technology Report No10 2000).....</i>	<i>49</i>
<b>Kuva 14.</b>	<i>Tyypillinen vikapuu sekä tavallisimpien tapahtumien ja porttien piirrosmerrat (RoyMech 2014).....</i>	<i>57</i>
<b>Kuva 15.</b>	<i>Tyypillinen tapahtumapuu kolmella turvallisuustoiminnolla: onnettomuusketju havainnollistaa epäonnistuneiden tapahtumien sarjan (Ajit et al. 2010) .....</i>	<i>59</i>
<b>Kuva 16.</b>	<i>Luotettavuuden varmistusprosessi .....</i>	<i>63</i>
<b>Kuva 17.</b>	<i>KVL1: vikapuu.....</i>	<i>68</i>

<b>Kuva 18.</b>	<i>KVL1: Vikapuu huipputapahtumalle ” Virran sisääntulo vikaantuu ympäristöolosuhteiden vaikutuksesta ”</i>	69
<b>Kuva 19.</b>	<i>KVL1: Vikapuu huipputapahtumalle ” Ohjaussignaalinluku vikaantuu ympäristöolosuhteiden vaikutuksesta ”</i>	70
<b>Kuva 20.</b>	<i>KVL1: Vikapuu huipputapahtumalle ” Virranmittaus vikaantuu ympäristöolosuhteiden vaikutuksesta ”</i>	71
<b>Kuva 21.</b>	<i>KVL1: Vikapuu huipputapahtumalle ” Ethernet vikaantuu ympäristöolosuhteiden vaikutuksesta ”</i>	72
<b>Kuva 22.</b>	<i>KVL1: Vikapuu huipputapahtumalle ” Releulostulo vikaantuu ympäristöolosuhteiden vaikutuksesta ”</i>	73
<b>Kuva 23.</b>	<i>KVL1:n vikaantumiseen tähtäävä testisarja</i>	75
<b>Kuva 24.</b>	<i>KVL2: Vikapuu huipputapahtumalle ” Nestekidenäyttö vikaantuu ympäristöolosuhteiden vaikutuksesta ”</i>	78



## TAULUKKOLUETTELO

<b>Taulukko 1.</b>	<i>Yleisimpiä kerta- ja kestopuoveja sekä kumeja teollisuuden sovelluksissa. (Raaka-ainekäsikirja - Muovit ja kumit 2001)</i> .....	8
<b>Taulukko 2.</b>	<i>Metallimateriaalien ja suojamaaliyhdistelmien kestävyysluokat (ISO 9223 2012; SFS-EN ISO 12944 1998)</i> .....	12
<b>Taulukko 3.</b>	<i>Erilaisia tapoja luoda monipuolinen kiihdytetty vaikutus HALT:ssa mekaanisille, sähkömekaanisille ja sähköisille komponenteille. (O' Connor &amp; Kleyner 2012)</i> .....	36
<b>Taulukko 4.</b>	<i>Ympäristöolosuhdematriisi olennaisten olosuhdetekijöiden tunnistamiseen (PD-EC-1101 2014)</i> .....	47
<b>Taulukko 5.</b>	<i>Tyypillisten analysointimenetelmien ominaisuudet (Especially technology report No.10 2000)</i> .....	53
<b>Taulukko 6.</b>	<i>FTA ja FMEA -analysointimenetelmien soveltuvuus erilaisiin tilanteisiin (RIAC 2014)</i> .....	54
<b>Taulukko 7.</b>	<i>FMEA -taulukko, jossa V = seurauksen vakavuus, E = vikamuodon esiintymisen todennäköisyys, H = vikamuodon havaitsemisen todennäköisyys ja VEH on näiden kolmen tulo. (O' Connor &amp; Kleyner 2012 s.186)</i> .....	55
<b>Taulukko 8.</b>	<i>Ympäristöolosuhdematriisi KVL:n rasitusolosuhteiden yhteisvaikutusten havainnollistamiseksi</i> .....	74

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

ALT	Accelerated Life Test
EN	European Standards
EOS	Electrical Overstress
ESD	Electrostatic Discharge
ETA	Effect tree analysis
FEM	Federation Europeenne de la Manutention
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FTA	Fault Tree Analysis
HALT	Highly Accelerated Life Test
IP	International Protection
ISO	International Organization for Standardization
JEDEC	Joint Electron Device Engineering Council
MTBF	Mean Time between Failures
MTTF	Mean Time to Failure
MTTR	Mean Time to Repair
RoHS	Restriction of Hazardous Substances
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment

# 1 JOHDANTO

Sähkökomponenttien ja -laitteiden jatkuvasti pienevä koko ja niiden kasvava pakkaustiheys ovat johtaneet luotettavuusvaatimusten kiristymiseen. Suunnittelu- ja mallinnusohjelmien kehittyminen on johtanut siihen, että suunnittelurajat ovat kaventuneet. Lisäksi kasvaneet suorituskykyvaatimukset, kilpailu ja laitteiden monimutkaistuminen asettavat omat vaatimuksensa luotettavuudelle. Testaus on edelleen yksi yleisimmin käytetyistä luotettavuuden varmistamismenetelmistä. Laitteiden eri toimintojen suuri määrä vaatii, että komponenttitestauksen lisäksi myös kokonaisten laitteiden luotettavuutta testataan. Käyttämällä testauksessa todellisia ympäristöolosuhteita rankempia olosuhteita, saadaan testausaikaa lyhennettyä ja ennen kaikkea löydetään komponentin tai laitteen tekniset rajat sekä vikamekanismit. Tämä tieto mahdollistaa tarvittavien parannuksien tekemisen ennen laitteen päättymistä asiakkaalle ja sitä kautta myös luotettavuuden parantamisen. Testauksella voidaan tähdätä myös vikamekanismien etsimisen sijaan komponentin tai laitteen jo olemassa olevan riittävän luotettavuuden varmistamiseen. Aina testaus ei kuitenkaan ole mahdollista tai sitä ei jostain syystä haluta tehdä. Tällöin sovelletaan jo opittua tietoa, kenttätietoa, mallinnusta ja erilaisia luotettavuuden analysointimenetelmiä. Testauksen ja muiden luotettavuuden analysointimenetelmien avulla arvioidaan komponentin tai laitteen luotettavuus ja elinikä sen elinkaaren eri käyttöympäristöjen olosuhteissa.

Luotettavuuden käsite kiteytyy hyvin peruslauseeseen, jonka mukaan ketju on juuri niin kestävä kuin sen heikoin lenkki. Luotettavuuden varmistuksen tärkein tehtävä on varmistaa, että tämä heikoinkin lenkki on riittävän kestävä. Ensimmäiset luotettavuuden varmistusmenetelmät on kehitetty toisen maailman sodan aikaan Yhdysvalloissa (Ajit et al. 2010). Tavoitteet menetelmien käytössä ovat edelleen samat: pidentää laitteen käyttöikää paremman suunnittelun avulla sekä luotettavuuden lisääminen laadun parantamisen ja laadun tarkkailun avulla. Näiden parannusten avulla pienennetään niin valmistukseen kuin käyttöön liittyviä kustannuksia. Valmistuksessa viallisten tuotteiden uudelleen valmistamiseen kuluva tuottamaton aika sekä materiaalihävikki vähenevät ja käytössä syntyvien vikojen korjaamiseen vaadittavat resurssit pienenevät. Huomioitavaa on, että korjaamiskustannuksiin kuuluvat varaosa- ja työ kustannusten lisäksi kuljetus- ja varastointikustannukset.

Tämän työn avulla halutaan laajentaa nosturien luotettavuuteen vaikuttavien tekijöiden tuntemusta olosuhdetekijöiden vaikutuksiin. Laitteen elinkaaren eri vaiheiden olosuhdetekijöiden ja niiden vaikutusten parempi tuntemus mahdollistaa testauksen keskittämisen vikaantumisen kannalta olennaisiin rasituksiin. Lisäksi halutaan selvittää, onko testaus aina pakollista vai olisiko luotettavuuden varmistus mahdollista suorittaa luotettavasti

analysointimenetelmiä hyödyntäen. Luotettavuuden varmistuksessa tulee aina ottaa huomioon myös rasitusten aikariippuvuus. Erilaiset ympäristöolosuhteet voivat aiheuttaa laitteen vikaantumisen niin hetkellisen liian suuren rasituksen kuin pitkäaikaisen vähittäisen materiaalin rappeutumisen kautta (esimerkiksi väsyminen tai korrosio). Tällä hetkellä nosturisovelluksille tehtävät testit painottuvat joko hetkellisen toiminnallisuuden testaamiseen tai vaihtoehtoisesti eliniän määrittämiseen, mutta tällöinkin tarkastelun lähtökohdana on tyypillisesti testata laitteen kuormankantokykyä.

Tämän työn tavoitteena on tarkastella ympäristöolosuhteiden vaikutuksia standardi- ja prosessinosturien komponentteihin luotettavuustekniikan keinoin. Työssä käsitellään niin mekaanisten kuin sähköisten komponenttien vikaantumista. Tarkastelu painotetaan kuitenkin selkeästi sähkölaitteiden ja -komponenttien puolelle, sillä ne ovat nosturisovelluksissa vielä suhteellisen uusia tekniikoita. Mekaanisten komponenttien vikaantuminen on puolestaan hyvin tunnettua ja uusien rakenteiden suunnittelussa hyödynnetään paljon jo hyviksi todettuja ratkaisuja. Tarkastelun pääpaino on olosuhdetestauksen ja eri luotettavuuden analysointimenetelmien tuntemuksen parantamisessa. Tiivistetysti työn tavoitteena on antaa vastaukset seuraaviin kysymyksiin:

1. Mitkä olosuhdetekijät ovat nosturisovellusten luotettavuuden kannalta olennaisimpia?
2. Millä eri analysointimenetelmillä luotettavuuden varmistus olisi parasta tehdä eri tilanteissa?
3. Voidaanko testaus joissain tilanteissa korvata kokonaisuudessaan analysointimenetelmillä?
4. Miten olosuhdetestaus tulisi toteuttaa?
5. Miten tehdään onnistunut testisuunnitelma olosuhdetestausta varten?

Tämän työn tärkeimpinä lähteinä ovat olleet neljä luotettavuustekniikan perusteosta: Ajit et al. (2010), Birolini (2010), Cristaldi et al. (2011) ja O'Connor & Kleyner (2012). Especin tekniset raportit, joita on julkaistu useita vuodesta 1996 lähtien, ovat puolestaan olleet merkittävä apu ympäristörasitusten, niiden yhteisvaikutusten ja olosuhdetestauksen määrittelyssä. Lisäksi näiden määrittelyssä on hyödynnetty joukkoa luotettavuusaiheisia standardeja.

Luvussa 2 käsitellään nosturin rakenne pääpiirteissään sekä nosturin käyttöympäristön olosuhteet. Samassa kappaleessa tarkastellaan nostureissa käytettäviä materiaaleja, jotka voidaan jakaa metalleihin ja muoveihin. Molempia materiaaleja löytyy niin mekaanisista kuin sähköisistä komponenteista, mutta ympäristön rasitustekijöiden vaikutukset ovat vahvasti riippuvaisia itse materiaalista.

Luvussa 3 käydään läpi nosturille tyypillisiä rasitustekijöitä, esitellään niiden vaikutuksia eri materiaalien luotettavuuteen sekä perehdytään vikaantumisen peruskäsitteisiin. Rasitustekijät voidaan jakaa ilmastollisiin ja dynaamisiin rasituksiin. Lisäksi rasitustekijöillä

on usein yhteisvaikutuksia, jotka voivat aiheuttaa vikaantumisen huomattavasti nopeammin kuin samojen rasiustekijöiden vaikuttaessa erikseen.

Luvussa 4 esitellään erilaisia luotettavuuden varmistusmenetelmiä ja kuvaillaan niiden soveltuvuutta erilaisiin kohteisiin. Luotettavuuden varmistusmenetelmät voidaan jakaa karkeasti testaus- ja analysointimenetelmiin. Toisaalta ne voidaan jakaa myös joko laadullisiin tai määrällisiin menetelmiin. Laadullisien menetelmien avulla pyritään lisäämään tietoutta laitteen vikamekanismeista ja vikaantumiskäyttäytymisestä. Määrällisten menetelmien tavoitteena on puolestaan tuottaa numeerista tietoa laitteen luotettavuudesta. Numeerinen tieto voi tarkoittaa esimerkiksi laitteen elinikää, saatavuutta tai todennäköisyyttä jollekin tietylle vikamekanismille. Testausmenetelmät voidaan puolestaan jakaa kahteen sen perusteella, halutaanko näyttöön vikaantuvan vai ei. Testaus- ja analysointimenetelmiä voidaan käyttää erikseen, mutta tyypillisesti niitä käytetään tukemaan toisiaan.

Luvussa 5 sovelletaan luotettavuuden varmistusmenetelmiä kahdelle eri sähkölaitteelle: kunnonvalvontalaite 1 ja kunnonvalvontalaite 2. Luvussa 6 tarkastellaan työn tuloksia ja eri luotettavuuden varmistusmenetelmien soveltuvuutta eri käyttökohteisiin. Luvussa 7 on yhteenveto koko työstä ja pohditaan mahdollisia jatkotutkimuskohteita.

## 2 NOSTURIN KÄYTTÖ JA MATERIAALIT

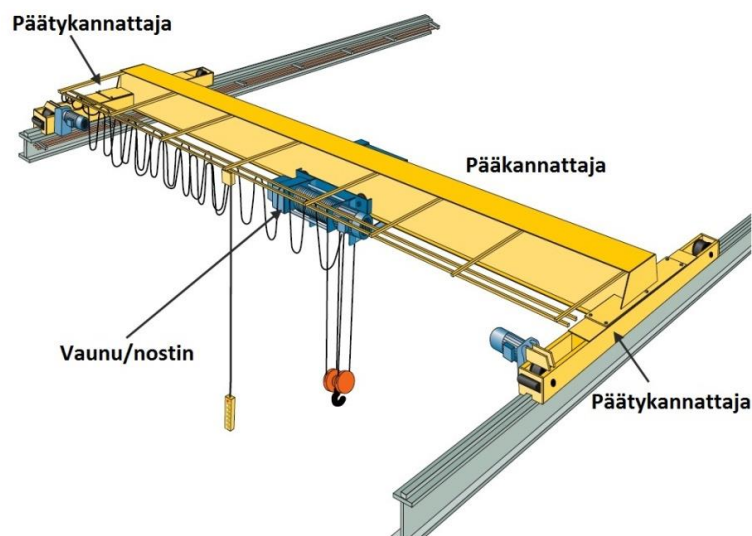
Tässä luvussa käydään läpi nosturin yleinen määritelmä ja kuvataan lyhyesti työn kannalta oleelliset nosturityypit sekä näiden tärkeimmät komponentit. Nosturisovelluksissa käytössä olevat materiaalit ja niiden pintakäsittelyt käydään läpi esimerkkien avulla sekä esitellään nosturien käyttöympäristöt ja niiden yleisimmät rasitustekijät. Tarkasteltavat ympäristöolosuhteet voidaan jakaa ilmastollisiin ja dynaamisiin ympäristöolosuhteisiin.

### 2.1 Nosturi

Valtioneuvoston päätöksessä nosturi on määritelty konekäyttöiseksi nostolaitteeksi, jolla nostetaan, lasketaan ja siirretään kuormaa. Kuorma liikkuu nostoköyden, -ketjun tai vastaavan rakenteen ohjaamana. Saman säädöksen mukaan nostureiksi lasketaan myös sellaiset nostolaitteet, joissa kuorman heiluntaa on rajoitettu nosturin mukana siirtyvillä lisälaitteilla. (VNp 1430 1993)

Nosturien luokitteluun voidaan käyttää useita eri periaatteita. Tämän työn kannalta oleelliset nosturit voidaan jakaa käytön mukaan karkeasti kolmeen luokkaan: prosessinostureihin, standardinostureihin ja työpistenostureihin.

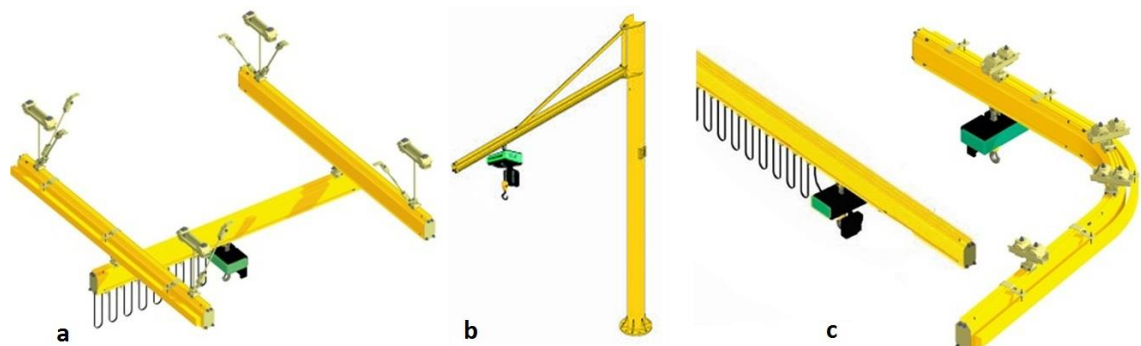
Prosessi- ja standardinosturi kuuluvat rakenteensa puolesta siltanostureihin, joka on yleinen nosturityyppi teollisuuden laitoksissa. Siltanosturin rakenteen tärkeimpiin komponentteihin kuuluvat joko yksi tai useampi pää- sekä päätykannattaja, nostovaunu tai nostin, mahdollinen nostovaunun siirtokoneisto, nostoköysi koukkuineen sekä ohjauslaite. Siltanosturin rakenne on esitetty kuvassa 1.



**Kuva 1.** Tyypillisen yksipääkannattajaisen siltanosturin rakenne. (China Mine Cranes Co.Ltd 2014)

Siltanosturin nostin on tyypillisesti köysinostin. Yleisimmin siltanosturi koostuu yhdestä pääkannattajasta eli sillasta, joka liikkuu kahden päätykannattajan varassa kiskoissa. Vaunu ja nostin on kiinnitetty pääkannattajaan ja ne voivat mahdollisuuksien mukaan liikkua sitä pitkin. (ISO 4306-1 2007) Prosessinosturi soveltuu raskaaseen käyttöön, joka sisältää suurien kuormien noston ja laitteen korkean käyttöasteen. Standardinosturi on rakenteeltaan prosessinosturia kevyempi ja soveltuu paremmin pienien konepajojen käyttöön, joissa kuormat ovat pienemmät ja käyttö satunnaisempaa.

Työpistenosturia käytetään erilaisten kokoonpanotehtävien apuvälineenä ja sen rakenne voi vaihdella hyvin paljon sovelluksesta riippuen. Työpistenostureita ovat esimerkiksi paineilmakeventimet, pylväs- ja seinäkiertonosturit, erilaiset kevytnosturijärjestelmät sekä siirrettävät pukkinosturit. (ISO 4306-1 2007) Kuvassa 2 on esitetty kolme erilaista variaatiota työpistenosturista.



**Kuva 2.** Työpistenosturien mahdollisia rakenteita: a) kevytnosturijärjestelmä, b) pylväsnosturi ja c) yksikiskoratanosturi. (Finnlift 2014)

Työpistenosturissa nostin on tyypillisesti ketjunostin. Työpistenosturin erottaa pelkästä nostimesta, jokin tukirakenne, johon nostin on kiinnitetty ja joka sovelluksesta riippuen voi mahdollistaa kuorman siirtämisen ylös ja alas liikkeen lisäksi myös sivuttaissuunnassa.

Luotettavuustarkastelun kannalta olennaisia nosturikomponentteja ovat ne, joiden vikaantuminen aiheuttaa luotettavuuden laskun. Näitä komponentteja kutsutaan kriittisiksi komponenteiksi ja nosturissa ne käsittävät erilaiset kuormaa kantavat komponentit, toimielinkomponentit sekä ne komponentit, jotka välittävät toimilaitteen liikettä. Kuormaa kantavia komponentteja ovat esimerkiksi pää- ja päätykannattaja. Nostin ja moottori ovat esimerkkejä toimielinkomponenteista. Toimilaitteen liikettä välittävät komponentit kattavat köydet, ketjut, köysipyörät, kantopyörät sekä laakerit.

## 2.2 Nosturissa käytettävät materiaalit

Nostureissa käytettävät komponentit voidaan jakaa materiaalin perusteella karkeasti kahteen: metallikomponentteihin ja muovikomponentteihin. Mekaaniset komponentit ovat pääosin metallisia, kun taas elektroniikkakomponenteissa on sekä metallia että muovia. Tiivisteissä ja koteloissa materiaalina käytetään usein muovia tai kumia.

Ympäristöolosuhteet vaikuttavat eri tavalla metalleihin ja muoveihin ja siksi tämä jaottelu on valittu materiaalitarkastelun rungoksi. Esimerkiksi kosteuden vaikutus metalleihin on korrodoiva, kun taas muoveille kosteus aiheuttaa ongelmia veden imeytymisen ja turpoamisen kautta. UV -säteilyllä ei juuri ole vaikutusta metallisiin komponentteihin, mutta muovikomponenteille se voi aiheuttaa voimakastakin hapertumista. (Korroosiokäsikirja 2004) Näitä ilmaston räsitusetekijöihin liittyviä eroavaisuuksia käsitellään tarkemmin kapaleessa 2.3, jossa esitellään käyttöympäristöt ja niiden räsitusetekijät.

### 2.2.1 Metallit ja pinnan viimeistely

Nostureissa on metalleja monissa eri komponenteissa, niin kantavissa kuin toiminnallisissakin osissa. Nostureissa yleisesti käytettävät metallimateriaalit voidaan jakaa kolmeen: teräksiin, valurautoihin ja alumiiniseoksiin. Teräkset voidaan jakaa edelleen rakenne-, hiiletys- ja nuorrutusteräksiin sekä valuraudat pallo- ja suomugrafiittivalurautoihin. Teräkset ja valuraudat erotetaan toisistaan hiilipitoisuuden perusteella, koska sillä on suuri vaikutus rauta-hiili-seosten ominaisuuksiin. Teräksillä hiilipitoisuus on 0,05 - 2,1 % ja tätä korkeamman hiilipitoisuuden rauta-hiili-seokset lasketaan valurautoihin. Poikkeuksellisen haastavissa olosuhteissa voidaan käyttää myös ruostumatonta terästä. (Lindroos et al. 1986; Höök et al. 2009)

Malmista valmistettu metalli tai metalliseos on metastabiilissa tilassa ja siitä syystä se on hyvin reaktiivinen. Materiaali pyrkii aina kohti alimman energian tilaa. Tätä alimman energian tilaa kutsutaan stabiiliksi tilaksi, jonka teräs saavuttaa korroosion avulla. Teräkset suojataan lähes kaikissa olosuhteissa pinnoitteella. Pinnoituksella haetaan suojaa juuri korroosiota vastaan, joka on yksi suurimmista vikaantumisen aiheuttajista teräksillä. (Korroosiokäsikirja 2004; SFS-EN ISO 12944 1998)

Nosturien käyttöympäristö voi vaihdella tehdasilmastosta ulkoilmaan joko katetussa tai kattamattomassa ympäristössä. Tällaisissa sovelluksissa metallit tyypillisesti korroosiosuojataan erilaisia maalipinnoitteita käyttäen tai kuumasinkittämällä (Korroosiokäsikirja 2004). Myös sähkösinkittyjä ja fosfatoituja osia voidaan käyttää.

Korroosionestomaalausta käytetään sekä sisä- että ulkotiloissa eristämään suojattava metallikomponentti ympäristön syövyttäviltä vaikutuksilta ja antamaan sille samalla haluttu ulkonäkö. (Korroosiokäsikirja 2004) Nosturisovelluksissa tyypilliset kalvon paksuudet vaihtelevat välillä 100 - 200 µm korroosiorasitusluokasta riippuen. Standardi SFS-EN ISO 12944 (1998) käy läpi maaliyhdistelmien käyttöön liittyvät tekijät korroosionsuojauksessa sekä esittelee mahdollisia maalipinnoitussysteemejä eri rasitusolosuhteisiin.

Sinkkipinnoitteen hyvät korroosiosuojausominaisuudet perustuvat sen muodostamaan sulkukerrokseen sekä anodiseen suojaukseen. Sulkukerros eristää metallipinnan ympäröivistä räsitusetekijöistä, jolloin happi ja kosteus eivät pääse korrodoimaan metallipintaa. Anodinen suojaus perustuu sinkin epäjalouteen ja suureen syöpymistaipumukseen. Kun



sinkkikerrokseen tulee naarmuja tai kolhiintumia, sinkki syöpyy nopeasti tukkien syntyneen aukon sulkukerroksessa korroosiotuotteillaan. Sinkkipinnoite kuluu prosessissa ja tästä johtuen suojauskyky on suoraan verrannollinen sinkkipinnoitteen paksuuteen. (Korroosiokäsikirja 2004)

Sähkösinkittyjen osien korroosionkestävyys on kuumasinkittyjä osia huonompi ohuemasta kalvon paksuudesta johtuen. Sähkösinkittyä tuotetta tulisikin käyttää ainoastaan sisätiloissa. Lisäksi se herkistää vetyhaurauteen eikä tästä syystä ole suositeltava pinnoitusmenetelmä esimerkiksi yli 8.8 lujuusluokan pulteissa. (Lindroos et al. 1986; Ruuviliitoksen suunnittelu 2014) Sähkösinkitty pinnoite passivoidaan joko kelta-, sini- tai mustapassivoinnilla, joita kaikkia voidaan tänä päivänä tehdä kansainvälisten ympäristövaatimusten (kuten RoHS ja WEEE -säädökset) mukaisesti kolmen arvoista kromia käyttäen. (Sähkösinkitys ja sinkkinikkeli 2014, Trivalent Chromates FAQ 2014)

Tyypillisiä fosfatointimenetelmiä taas ovat sinkki- ja mangaanifosfatoiointi, joista ensimmäinen on nosturikäytössä pääasiallinen menetelmä (Donofrio 2000, Flink et al. 2014). Fosfatoinnilla on tarkoitus tuottaa passivaatiokerros komponentin pintaan samoin kuin sinkkipinnoitteella. Fosfatoiointia voidaan käyttää lisäksi maalauksen esikäsitteilynä, sillä se luo hyvät adheesio-ominaisuudet pinnoitteelle (Donofrio 2000, Flink et al. 2014).

Alumiiniseoksien mahdollisia sovelluskohteita nosturissa ovat kiinnityslaipat, kitkalevyt ja moottorin rungot. Alumiinin korroosionkesto perustuu pintaan muodostuvaan paksuun (0,01 - 0,1  $\mu\text{m}$ ), kovaan ja tiiviiseen oksidikerrokseen. Oksidikerros korjaantuu nopeasti, jos pinta naarmuuntuu tai kolhiintuu. Alumiini-magnesium sekä alumiini-magnesium-pii-seokset ovat usein käytettyjä seoksia nosturisovelluksissa niiden hyvien korroosiokesto-ominaisuuksien ansiosta. Muista alumiiniseoksista poiketen näiden seoksien oksidikerroksen muodostuminen on puhtaan alumiinin luokkaa. (Polmear 2005; Raaka-ainekäsikirja - Alumiinit 2002)

Alumiinilla on jo luonnostaan hyvä korroosionkesto, mutta sitä voidaan parantaa edelleen anodisoimalla. Al-Mg- ja Al-Mg-Si-seokset soveltuvat hyvin anodisointiin. Anodisoinnissa luonnollisesti muodostuvan oksidikerroksen paksuutta kasvatetaan ja näin kappaleen korroosionkesto paranee. (Korroosiokäsikirja 2004)

Tarkasteltaessa nosturin metallisia komponentteja tulee huomioida myös erilaisten mekaanisten jännitysten vaikutukset, sillä pääosin nosturin kantavat rakenteet ovat metallisia. (O'Connor & Kleyner 2012) Mekaaniset jännitykset, kuten komponentin sisäiset ja ulkoiset kuormitukset, värinät ja shokit, on esitelty tarkemmin kappaleessa 2.4.2 *Dynaamiset rasitustekijät*.

## 2.2.2 Muovit ja kumit

Muovit jaetaan usein muokattavuuden perusteella kerta- ja kestopuoveihin. Kertamuoville voidaan antaa sen lopullinen muoto vain kerran. Tämän jälkeen kuumennus hajottaa kertamuovin rakenteen. Kestomuovia taas voidaan muovata useampaan kertaan. Tosin sen ominaisuudet heikkenevät aina uudelleen lämmityksen ja muovauksen yhteydessä. Kestomuovit voidaan jakaa edelleen amorfisiin ja osakiteisiin muoveihin. Näiden välillä erot liittyvät visuaalisiin tekijöihin sekä käyttölämpötiloihin. Amorfiset muovit voivat olla läpinäkyviä ja niiden käyttölämpötila on lasisiirtymälämpötilan alapuolella. Osakiteiset muovit taas eivät ole läpinäkyviä ja näiden käyttölämpötilat ovat lasisiirtymä- ja sulamislämpötilan välissä. (Raaka-ainekäsikirja - Muovi ja kumit 2001)

Nosturisovelluksissa voidaan käyttää niin kerta- kuin kestopuoveja. Kestomuoveja käytetään kuitenkin enemmän, vaikka kertamuoveilla on tyypillisesti muun muassa parempi kemikaalien ja väsymisen kestävyys. Tämä johtuu kestopuovien hyvistä muokkausominaisuuksista ja sitä kautta myös halvemmista valmistusprosesseista. (Callister & Rethwisch 2007; Raaka-ainekäsikirja - Muovit ja kumit 2001) Tiivisteissä ja nosturin ohjauslaitteiden näppäimissä käytetään tyypillisesti kumia eli elastomeeria. Nostureissa käytetyt polymeerit ovat yhdenmukaisia yleisesti teollisuuden alalla paljon käytettyjen polymeerien kanssa. Teollisuuden yleisesti käytetyt kerta- ja kestopuovit sekä kumit on esitetty taulukossa 1.

**Taulukko 1.** Yleisimpiä kerta- ja kestopuoveja sekä kumeja teollisuuden sovelluksissa. (Raaka-ainekäsikirja - Muovit ja kumit 2001)

Kertamuovit	Kestomuovit	Kumit
Epoksi (EP) Polyuretaani (PUR)	Polyeteeni (PE) Polypropeeni (PP) Polyvinyylikloridi (PVC) Polystyreeni (PS) ABS -muovit Polykarbonaatti (PC) Polyamidi (PA) Polytetrafluorieteeni (PTFE) Polyasetali (POM) Polybuteenitereftalaatti (PBT)	Nitriilikumi (NBR) Luonnonkumi (NR) Synteettinen kumi eli neopreeni Eteenipropeenidieeni-Kumi (EPDM)

Muovien ominaisuudet vaihtelevat hyvin paljon eri laatujen välillä. Oikean muoviseoksen valinnalla onkin suuri merkitys muovikomponentin kestävyys. Eri muoviseoksille ei ole määritelty tarkkaa koostumusta, kuten metalliseoksille, vaan samalla tavalla nimetty muovi voi toisella valmistajalla sisältää hieman eri seos- ja lisäaineita kuin toisella. Myös samalta valmistajalta hankitun muovin pitoisuudet ja ominaisuudet voivat vaihdella erien välillä.

Muovien mekaaniset ominaisuudet jaetaan lyhyen ja pitkän aikavälin ominaisuuksiin. Lyhyen aikavälin ominaisuuksiin kuuluvat esimerkiksi murto- ja iskulujuus, kun taas pitkän aikavälin ominaisuuksia ovat muun muassa viruminen ja jännitysrelaksaatio. Ympäristöolosuhteet vaikuttavat molempiin ominaisuuksiin. (Duvall 2002)

Muoveilla ei tapahdu vastaavaa korrodoitumista kuin metalleilla. Silti voidaan puhua muovien korroosiosta tai vanhenemisesta. Tällä tarkoitetaan muovin ominaisuuksien heikkenemistä ja muuttumista ympäristöolosuhteiden johdosta. (Duvall 2002) Erityisesti ulkoilma-altistuksessa ympäristöolosuhteet vaikuttavat muoveihin metalleja monimuotoisemmin.

Muovien kemiallisesta monimutkaisuudesta johtuen, niiden vanhenemismekanismit eivät ole täysin tunnettuja. Muovien ominaisuudet voivat heiketä lämpötilan muutosten, UV -säteilyn, veden imeytymisen tai kemikaalien vaikutuksesta. Monet muovien ominaisuudet, kuten mekaaninen lujuus ja kemikaalien kesto, ovat riippuvaisia polymeerin moolimassasta. Tietyt ilmastolliset rasitustekijät aiheuttavat polymeerin molekyyliketjujen katkeilua ja sitä kautta moolimassan laskua. Molekyyliketjujen katkeilua aiheuttavat erilaiset kemialliset reaktiot (happi, otsoni), UV -säteily ja korkea lämpötila. Yleisesti muovien kemikaalien kestosta voidaan todeta, että ne kestävät happamia ja emäksisiä liuoksia metalleja paremmin. (Callister & Rethwisch 2007, Raaka-ainekäsikirja - Muovit ja kumit 2001)

## 2.3 Käyttöympäristöt

Nosturin käyttöympäristön tunteminen luo perustan sen vaikutusten arvioimiselle. Käyttöympäristön lisäksi tulee huomioida myös muut ympäristöt, joille nosturin komponentit altistuvat nosturin eliniän aikana, kuten valmistus-, kuljetus- tai varastointiolosuhteet.

Nosturien käyttöympäristöt vaihtelevat hyvin paljon eri teollisuuden alojen ja maantieteellisen sijainnin suhteen, ja siksi onkin tärkeää pyrkiä ottamaan käyttöympäristön rasitustekijät huomioon jo heti nosturin suunnitteluvaiheessa. (O'Connor & Kleyner 2012) Juuri käyttöympäristöjen moninaisuudesta johtuen on mahdotonta määrittää yhtä kaiken kattavaa kuvausta käyttöympäristöistä. Tässä kappaleessa käydään läpi, millaisia eri käyttöympäristöjä teollisuuden alalla on ja miten nämä tulisi määrittää.

Tavallisesti nosturin käyttölämpötila määritellään tilausvahvistuksessa. Tarkasteltavien nosturityyppien tyypillinen alin käyttölämpötila tehdään sisällä tai ulkona katoksen alla on -20...-10 °C välillä kun taas ylin käyttölämpötila +40...+50 °C välillä. Ilman epäpuhtauksien määrä on tavallisesti pieni ja suhteellinen ilmankosteus alle 90 %. Nosturille on määriteltä myös maksimikorkeus meren pinnasta. Nosturi tulee sijoittaa niin, että se on alle 1000 metriä merenpinnan yläpuolella. Jos tätä ei voida toteuttaa, tulee se ottaa huomioon nosturin maksimikuormassa. (Stahl - Product information 2013) Katetulla alueella

ei ole UV -säteilyä, sadetta tai lunta, jotka vahingoittaisivat nosturin rakennetta. Useimmiten tällaisiin olosuhteisiin suunniteltuja nostureita voidaan käyttää tietyin lisävarustein (esimerkiksi kotelot ja katteet sekä ilmastointi) myös ulkona ilman katosta.

Satamissa ja tietyillä teollisuuden aloilla nosturit voivat kohdata huomattavasti rajumpia käyttöympäristöjä. Käyttöympäristö lasketaan haastavaksi, jos nosturi altistuu haitallisille kemikaaleille, suolaiselle meri-ilmastolle, korkealle ilmankosteudelle, matalalle tai korkealle lämpötilalle, UV -säteilylle tai mekaaniselle kulutukselle. Myös olosuhteiden vaihtelu suhteellisen pienen ajan sisällä, luo haastavan ympäristön nosturin komponenteille. Esimerkiksi suuret lämpötilaerot vuorokauden sisällä lisäävät veden kondensoitumisen todennäköisyyttä, joka taas lisää korrodoitumisen todennäköisyyttä.

Nosturin mekaanisille komponenteille määritetään tyypillisesti ilmastorasitusluokka ja kestävyysluokka standardin ISO 9223 mukaisesti. Tämän kanssa yhdenmukaista suomenkielistä standardia SFS-EN ISO 12944 voidaan myös käyttää. Näissä eri ilmastot jaetaan maaseutu-, kaupunki-, teollisuus- ja meri-ilmastoon, joista meri-ilmastoa pidetään aggressiivisimpana käyttöympäristönä. Kosteuden ja ilman kloori-ionipitoisuuden suuri määrä tekee meri-ilmastosta erityisen korrodoivan. (Griffin 2006; ISO 9223 2012; SFS-EN ISO 12944 1998) Tehdasilmastossa saattaa esiintyä myös korkeita tai matalia käyttölämpötiloja sekä huomattavia määriä ilman epäpuhtauksia ja pölyä. Haastavimpia ovat kemian teollisuuden laitokset, paperi- ja sellutehtaat, kaivos- ja metallin jalostusteollisuus, ydinvoimalat ja elintarviketeollisuus. (Korroosiokäsikirja 2004) Standardi ISO 9223 (2012) antaa karkean haarukan korroosion kannalta tärkeimmille ilman epäpuhtauksille eri ilmastoissa. Tulee kuitenkin ottaa huomioon, että nämä luvut ovat suuntaa antavia ja esimerkiksi teollisuuslaitoksien ilman epäpuhtauksien määrä on voimakkaasti riippuvainen teollisuuden alasta.

Käyttöympäristöt määritellään usein ilmoittamalla eri rasisitustekijöille ylä- ja alarajat (O'Connor & Kleyner 2012). Metallien, metalliseosten ja näiden pinnoitteiden kohdalla ympäristön rasisitustekijät määritellään useimmiten ilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan muodostaman kokonaisuuden eli niin kutsutun märkäajan ja ilman epäpuhtauksien perusteella. Märkäaika on se aika, jolloin ilmankosteus on yli 80 % ja lämpötila yli 0 °C. Tyypillisesti nosturien käyttöympäristöille ei määritellä eri epäpuhtauksien pitoisuuksien raja-arvoja. Kuten edellä todettiin, rakenteelle määritellään kuitenkin ilmastorasitusluokka, joka puolestaan ottaa karkeasti kantaa ilmaston epäpuhtauksien määrään. Yleisesti voidaan todeta, että metallien ilmastollisen korroosion kannalta merkittävimpiä ilman epäpuhtauksista ovat rikki- ja klooriyhdisteet, sillä nämä kiihdyttävät monien metallien korroosiota. (ISO 9223 2012)

Muovien kohdalla käyttöympäristön rasisitustekijöistä ainoastaan lämpötilalle voidaan määritellä ala- ja ylärajat. Muovien veden imeytyminen ilmoitetaan prosenttiluvulla, joka

kuvaa veteen upotuksesta johtuvaa prosentuaalista painon nousua. Muiden räsitusetekijöiden kestoa (esimerkiksi eri kemikaalit ja säteilyt) arvioidaan tavallisesti vain sanallisesti. (Raaka-ainekäsikirja - Muovit ja kumit 2001)

Suojaamattomilla sähkökomponenteilla ja -laitteilla on sellaisenaan huono ympäristön kesto. Ympäristön kestoa parannetaan tyypillisesti lisäämällä laitteen tiiviyyttä joko eristämällä tai koteloimalla. Kansainvälinen koteloluokitus, IP (International Protection), määrittelee eri luokat sen perusteella, kuinka hyvin rakenne suojaa komponenttia tai laitetta vierailta partikkeileilta ja vedeltä. IP-luokka ilmoitetaan tavallisesti kahdella numerolla ja mahdollisesti kahdella vapaaehtoisella kirjaimella. Ensimmäinen luku (0...6 tai X) määrittelee suojan vieraiden partikkeleiden tunkeutumista vastaan ja toinen (0...8 tai X) veden tunkeutumista vastaan. (SFS-EN 60529 2000) Nosturin sähkökomponentit on usein sijoitettu sähkökaappiin. Tämä mahdollistaa sen, ettei jokaisella komponentilla itsellään tarvitse olla käyttöympäristöön riittävää IP-lukua, vaan riittää, että sähkökaapilla on.

### 3 RASITUSTEKIJÄT

Nosturin tai sen komponenttien luotettavuuden varmistaminen vaatii hyvää tuntemusta käyttöympäristön rasitustekijöistä. Tämä ei kuitenkaan yksin riitä. Vaaditaan myös tuntemusta siitä, minkälaisia vaikutuksia näillä rasitustekijöillä voi olla tarkasteltavaan tuotteeseen, jotta voidaan arvioida mahdollisia vikaantumismuotoja. Rasitustekijät voidaan jakaa ilmastollisiin ja dynaamisiin rasitustekijöihin. Tässä kappaleessa tarkastellaan, mitkä rasitustekijät kuuluvat näihin ryhmiin sekä miten ne vaikuttavat nosturin komponentteihin.

Nosturille määritellään ilmastollisten rasitustekijöiden perusteella kestävyysluokka. Kestävyysluokka kuvaa tuotteen materiaalien ja pinnoitteiden korroosiokestävyyttä ja on määritelty standardeissa ISO 9223 ja SFS-EN ISO 12944. Kestävyysluokka on arvio tuotteen kestävydestä, jota voidaan käyttää apuna suunniteltaessa kunnossapito-ohjelmaa. Kestävyysluokkaa ei tule sekoittaa takuuajkaan, joka on yleensä lyhyempi. Taulukossa 2 on esitetty edellä mainittujen standardien mukaiset kestävyysluokat.

*Taulukko 2. Metallimateriaalien ja suojamateriaalijyhdistelmien kestävyysluokat (ISO 9223 2012; SFS-EN ISO 12944 1998)*

Kestävyysluokka	Aika
Alhainen (L)	2...5 vuotta
Kohtalainen (M)	5...15 vuotta
Korkea (H)	Yli 15 vuotta

Standardi ISO 9223 määrittelee metallien ja metalliseosten sekä maaliyhdistelmien kanalta olennaisimmat ilmastolliseen korroosioon liittyvät rasitustekijät. Näihin kuuluvat lämpötilan ja kosteuden yhteisvaikutus sekä rikkidioksidin ja kloridi-ionien määrä. (ISO 9223 2012) Lisäksi standardissa määritellään ilmastolliset rasitusluokat standardikoesauvan vuosittaisen painohäviön perusteella sekä kuvataan tyypillisiä luonnollisia ympäristöolosuhteita. Sanalliset kuvaukset mahdollistavat ilmastollisen rasitusluokan karkean arvioinnin. Nämä rasitusluokat ovat yhdenmukaisia suomenkielisen standardin SFS-EN ISO 12944 kanssa.

Muovien kohdalla ilmastollisten rasitustekijöiden keston määrittäminen on lähinnä vain lämpötilan osalta vastaava metallien kanssa. Lämpötilalle voidaan siis määrittää ylä- ja alaraja. Tavallisesti muovien kemikaalien kesto arvioidaan ainoastaan sanallisesti. Tarkasteltavan muovin voidaan todeta kestävä tiettyä kemikaalia esimerkiksi hyvin, rajoitetusti tai ei ollenkaan. Valmistaja ei myöskään anna ajallista määrettä kemikaalin kestolle. Yleisesti voidaan todeta, että muovien kemikaalien kesto heikkenee ajan kuluessa.

Muovien kosteuden kestoa tarkastellaan veden imeytymisen avulla. Veden imeytyminen ilmoitetaan tavallisesti veteen upotetun kappaleen prosentuaalisena painon nousuna tietyn ajan kuluessa tietyssä lämpötilassa. Yksi paljon käytetty veden absorption määrittäminen menetelmä on ASTM D 570 (1998). Tässä koestusaika on 24 h ja -lämpötila  $23 \pm 1$  °C.

Yleensä nosturille määritetään myös suunniteltu käyttöikä (*Design life*), joka perustuu mekaanisen kulumisen ja väsymisen arviointiin. Näihin vaikuttavat pääosin dynaamiset rasiustekijät. Suunniteltu käyttöikä kuvaa komponenttien käyttöikää työsykliä tai käyttötuntien funktiona. (ISO 12482 2014) Suunniteltu käyttöikä voi kuitenkin antaa virheellisen kuvan siitä, että vikaantuminen olisi mahdollinen vasta tämän ajan kuluttua. Todellisuudessa nosturin keskimääräinen elinikä on 2 - 3 kertainen suunniteltuun käyttöikään verrattuna. Vikaantuminen voi tästä huolimatta tapahtua koska tahansa ja ainoastaan todennäköisyys vikaantumiseen voi vaihdella ajan suhteen.

Käytännössä nosturin kannalta olennaisimmat dynaamiset rasitukset muodostuvat käytöstä johtuvista mekaanisista jännityksistä ja tärinästä. Nostureiden syklinen käyttö muodostaa haastavat olosuhteet väsymisen kannalta. Jos nosturin käyttö rajoittuu johonkin tiettyyn kapeaan käyttötapaan, voi se osaltaan lisätä komponenttien kulumista ja väsymistä. Lisäksi erilaiset poikkeustilanteet, kuten väärinkäytöt, onnettomuustilanteet tai hätäseis -napin käyttö pääasiallisena jarrutuksena, luovat nosturiin suunnittelemattomia dynaamisia jännityksiä.

Tämän kappaleen lopussa on käyty läpi erilaisten rasitusten vaikutuksia toisiinsa. Ympäristön rasitustekijät vaikuttavat harvoin yksinään ja siksi on tärkeää pohtia rasitustekijöiden yhteisvaikutuksia. Toisinaan yksittäinen rasitustekijä voi olla materiaalille tai komponentille harmiton, mutta muuttua hyvinkin aggressiiviseksi, kun tähän lisätään toinen rasitustekijä. Näin on esimerkiksi hiiliteräksen tapauksessa, joka on kuivassa kloorikaasussa ja kohtuullisessa lämpötilassa hyvin korroosiota kestävä. Hiiliteräs syöpyy kuitenkin voimakkaasti, jos esiintyy edes vähäistä kosteutta. (Korroosiokäsikirja 2004)

Rasitustekijöiden ei tarvitse välttämättä vaikuttaa samaan aikaan, vaan myös niiden peräkkäisellä vaikutuksella on merkitystä. Pinnoitettu teräskomponentti voi kestää käyttöympäristönsä olosuhteita hyvin. Jos se kuitenkin altistuu kuljetuksen yhteydessä tärinälle ja pinnoitteeseen syntyy epäjatkuvuuskohtia, on todennäköistä, että sen korroosionkesto-ominaisuudet muuttuvat merkittävästi. Vastaavasti varastoinnin aikana kosteudelle altistuneeseen sähkökomponenttiin syntyy ylimääräisiä sisäisiä jännityksiä tai jopa säröjä, kun vesi juottamisen yhteydessä höyrystyy. Sisäiset jännitykset ja säröt heikentävät komponentin rasitusten kestoa sen käyttöympäristössä.

### 3.1 Ilmastolliset rasitustekijät

Nosturin luotettavuuden kannalta merkittävimpiä ilmastollisia rasitustekijöitä ovat lämpötila ja sen vaihtelut, kosteus, ilman epäpuhtaudet ja UV -säteily. Lisäksi ilmastollisiin

rasitustekijöihin kuuluvat bakteerit ja home. Jälkimmäisenä mainituilla on nosturien kannalta kuitenkin pieni vaikutus ja siksi tässä työssä paneudutaan lähinnä ensin mainittuihin.

### 3.1.1 Lämpötila

Lämpötila voi aiheuttaa komponenteille rasituksia neljällä eri tavalla. Näitä ovat korkean lämpötilan, matalan lämpötilan, lämpösyklauksen tai lämpöshokin aiheuttamat rasitukset. Komponentin lämpötila on useimmiten yhteisvaikutus ympäristön lämpötilasta ja itse komponentin häviölämmöstä. Nosturin maksimikuormaa tulee laskea, jos ympäristön lämpötila ylittää nostomoottorille määritellyn ympäristön nimellislämpötilan, jotta kokonaislämpötila ei nouse liian korkeaksi. Lämpötila tulee lisäksi huomioida sähkökomponenteissa, jotka tuottavat itse häviölämpöä.

Nosturin komponentit eivät tyypillisesti altistu erityisen korkeille lämpötiloille. Suunnitellun maksimilämpötilan ylitys vaikuttaa kuitenkin komponenttien elinikään. Korkea lämpötila edesauttaa sähkökomponenttien ja muoviosien vanhenemista, pehmentää materiaaleja sekä nopeuttaa kemiallisia reaktioita. Lämpölaajeneminen voi johtaa rakenteellisiin vaurioihin johtuen lisääntyneestä mekaanisesta jännityksestä tai kulumisesta liikkuvien osien välillä. Lämpö heikentää eristemateriaalien kemiallista, mekaanista ja sähköistä kestävyyttä. Korkea lämpötila laskee myös voiteluaineiden viskositeettia, mikä voi johtaa huonoon voiteluun kosketuspinnoin ja kulumisvaurioihin. (Espec Technology Report No. 1 1996, PD-EC-1101 2014; SRC 2001)

Matala lämpötila luo hyvät olosuhteet veden kondensoitumiselle ja voi tätä kautta johtaa erilaisiin ongelmiin, kuten metallien korroosioon ja muovien veden imeytymiseen. Toisaalta lämpötilan laskiessa riittävästi, korroosio- ja muut kemialliset reaktiot estyvät, mutta muoviosiin imeytynyt tai koloihin sulkeutunut vesi voi jäätyessään aiheuttaa murtumia ja säröjä. Matalassa lämpötilassa materiaalien kimmomoduli nousee eli niistä tulee hauraampia, joka puolestaan lisää vaurioitumisen todennäköisyyttä. Lämpökutistuminen ja voiteluaineiden viskositeetin nousu voivat puolestaan johtaa kulumisvaurioihin. (PD-EC-1101 2014; SRC 2001)

Lämpösyklauksella tarkoitetaan lämpötilan jatkuvaa vaihtelua. Lämmön vaihtelu aiheuttaa lämpölaajenemisen ja -kutistumisen kautta vaihtelevia jännityksiä komponenttiin. Tämä voi johtaa virumiseen, jännitysrelaksaatioon tai termiseen väsymiseen. Nämä ilmiöt on esitetty tarkemmin kappaleessa 3.2.1 *Vaikutukset materiaaliin*. Lisäksi erilaiset lämpölaajenemiskertoimet voivat olla ongelmallisia komponenteissa, joissa on useita erilaisia materiaaleja liitettynä toisiinsa. Esimerkiksi sähkökomponenteissa lämpösyklauk voi johtaa liitosten aukeamisiin ja avoimiin piireihin. (SRC 2001)

Lämpöshokki syntyy, kun materiaali altistuu äkkinäiselle lämpötilan muutokselle. Lämpöshokki aiheuttaa epätasaisen lämpötilan muutoksen komponentissa, joka voi pahimmillaan johtaa murtumiseen. Amorfiset aineet, kuten lasi ja tietyt muovit, ovat alttiita



lämpöshokille niiden alhaisesta lämmönjohtavuudesta johtuen. Sähkökomponenteissa lämpöshokki voi johtaa liitosten aukeamisiin ja avoimin piireihin erilaisten materiaalien rajapinnoilla samoin kuin lämpösyklauksen tapauksessa. (SRC 2001)

### 3.1.2 Kosteus

Kosteus voi esiintyä nosturin käyttöympäristössä korkeana ilman kosteutena, kondensoituneena vetenä komponenttien pinnoilla, sateena (vesi-, räntä- ja lumisade), sumuna tai jäänä. Kosteus on räsitustekijänä haastava, koska sillä on taipumus päästä joka paikkaan. Joskus onkin parempi ratkaisu pyrkiä, täysin vesitiiviin rakenteen sijaan, suunnittelemaan rakenne, josta vesi sisälle päästyään pääsee myös pois.

Kosteus luo hyvät olosuhteet korroosiolle, joka on yksi merkittävimmistä komponenttien luotettavuutta laskevista tekijöistä. Korroosio vaikuttaa metalleihin ja muoveihin eri tavalla. Tästä johtuen muovien kohdalla puhutaan usein korroosion sijasta vanhenemisestä. (Callister & Rethwisch 2007) Eri komponenttien kohdalla vikaantumiseen johtava korroosion määrä voi myös vaihdella hyvin paljon. Esimerkiksi nosturin kiinnityspultti voi sopivissa olosuhteissa ruostua niin, että se on kauttaaltaan korroosiotuotteiden peitossa, mutta tämä ei kuitenkaan vaikuta sen toimintaan tai toimintavarmuuteen. Ulkonäkö voi kuitenkin herättää epäluottamusta. Toisaalta jo hyvin pieni, monesti täysin huomaamaton, oksidikerros elektroniikkakomponentin kosketuspinnalla voi estää virran kulun ja aiheuttaa vikaantumisen.

Metallien korroosio on useimmiten sähkökemiallinen reaktio, ja se voidaan jakaa kahdeksaan eri muotoon: yleinen, galvaaninen, rako-, piste-, raeraja-, eroosio- ja jännityskorroosio sekä valikoiva syöpyminen. Korroosioreaktio alkaa tavallisesti pinnasta, ja aiheuttaa materiaalin painohäviöitä joko liukenemalla tai hapettumalla muodostaen samalla kiinteitä korroosiotuotteita. Korroosio voi heikentää komponentin mekaanisia ominaisuuksia (kuten sitkeyttä ja lujuutta), ulkonäköä sekä muita fyysisiä ominaisuuksia. Sähkökomponenttien metallisissa osissa korroosio voi aiheuttaa värimuutoksia, sähköisten ominaisuuksien heikkenemistä, lisääntynyttä resistanssia, oikosulkuja tai avoimia piirejä. (Callister & Rethwisch 2007)

Käytännössä metallien korroosio on aina kosteuden ja muiden ilmastollisten räsitustekijöiden summa. Pääasiallisena tekijänä korroosiossa on kuitenkin märkäaika. Yleisesti voidaan todeta, että kylmässä tai kuivassa ilmastossa, korroosionopeus on lauhkeata ilmastoa alhaisempi. Suurimmillaan se on kuumassa ja kosteassa ilmastossa sekä meriilmastossa. Tässäkin tulee huomioida, että paikallisia eroja voi esiintyä. (SFS-EN ISO 12944 1998)

Kosteuden aiheuttama muovien vanheneminen on fysiokemiallinen reaktio, joka usein sisältää monenlaisia reaktioita ja niiden epäsuotuisia seurauksia. Kosteus voi aiheuttaa

veden imeytymisen kautta dimensioiden muutoksia ja lujuuden heikkenemistä sekä lasi-siirtymälämpötilan laskua. Kosteus voi myös aiheuttaa muovin asteittaista liukenemista. Liukeneminen tapahtuu, kun polymeeri on täysin liukeneva läsnä olevaan kosteuteen, kun taas turpoamiseen riittää osittainen liukeneminen. Kosteus voi olla joko puhdasta vettä tai veden ja ilman epäpuhtauksien muodostama liuote. Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että mitä enemmän polymeerin ja liuottimen kemiallisessa rakenteessa on yhtäläisyyttä, sitä todennäköisempää on turpoaminen ja liukeneminen. Sähkökomponenttien tapauksessa veden imeytymisellä on suuri merkitys, sillä se vaikuttaa polymeerin sähköisiin ominaisuuksiin. Tästä syystä polyeteeni, jolla on hyvin vähäinen veden imeytyminen, on suosittu eriste. (Callister & Rethwisch 2007; Duvall 2002)

Kosteus voi lisäksi aiheuttaa dielektrisen lujuuden laskua sähköisissä eristeissä, kiihdyttää kemiallisia muutoksia ja reaktioita yleisesti sekä mahdollistaa homeiden kasvun eri pinnoilla. (SRC 2001) Sähkökomponenteissa dendriittinen kasvu eli sähkökemiallinen migraatio on tyypillinen kosteuden aiheuttama ongelma. Siinä metalli muodostaa dendriittejä eli puumaisia metallikiteitä kosteuden, ilman epäpuhtauksien ja korkean jännitteen yhteisvaikutuksena. Vauriomuotona on tyypillisesti oikosulku. (Hienonen & Lah-  
tinen 2007)

### 3.1.3 Ilman epäpuhtaudet

Ilman epäpuhtauksilla on suuri merkitys metallien ilmastollisessa korroosiossa. Kosteus yksinään ei korrodoi metalleja vaan ilman epäpuhtauksia tarvitaan, jotta läsnä olevasta kosteudesta tulee sähköä johtava elektrolyytti. Ilmastollisen korroosion kannalta merkittävimpiä ilman epäpuhtauksia ovat rikki- ja kloori-ionit. Näiden lisäksi ilmassa voi olla erilaisia oksideja tai pölyä esimerkiksi kaupunkiliikenteestä tai teollisuuden prosesseista johtuen. Standardi ISO 9223 käsittelee jälkimmäiset ilman epäpuhtaudet lähinnä rikki- ja klooriyhdisteiden haitallisuutta vahvistavana tekijänä.

Ilman epäpuhtaudet voivat muodostaa komponentin pinnoilla olevan kosteuden kanssa happoja. Erilaiset kemikaalit voivat liuottaa tai pehmentää polymeeriä sekä aiheuttaa siinä jännityssäröilyä tai polymeeriketjujen hajoamista. Pehmenemisen yhteydessä polymeerin lujuus ja sitkeys laskevat sekä jännityksen alaisena olevan komponentin virumisnopeus kiihtyy. Ilmassa oleva happi voi aiheuttaa polymeerin oksidoitumista, jonka seurauksena ovat molekyyliketjujen katkeilu ja ominaisuuksien heikkeneminen. (Duvall 2002; SRC 2001)

Tehdas- ja kaupunki-ilmastossa olevalla pölyllä on omat vaikutuksensa komponenttien vikaantumiseen. Kosketuspinoilla tai voiteluaineessa pölyhiukkaset toimivat abrasiivisina partikkeleina ja edistävät pintojen kulumista. Hyvänä esimerkkinä ovat laakereiden vierintäpinnat, jotka vaurioituvat helposti, jos voiteluaineen sekaan pääsee vieraita par-

tikkeleita. Pöly voi tukkia laitteiden tuulettimia, jolloin alitehoinen jäähdytys johtaa komponenttien ylikuumentumiseen ja vikaantumiseen. Sähkökomponenteissa metallipöly voi aiheuttaa oikosulkuja. (SRC 2001)

### 3.1.4 UV -säteily

Tietyillä säteilyillä (elektroni-, röntgen-, gamma- ja UV -säteily) on riittävästi energiaa tunkeutuakseen polymeerin rakenteeseen ja vuorovaikuttaakseen atomien tai niiden elektronien kanssa. Näistä UV -säteily on tyypillinen ilmastollinen rasitus. Säteily voi vanhentaa polymeeriä aiheuttaen polymeeriketjujen katkeilua tai ristosilloittumista. Pitkäaikainen altistuminen UV -säteilylle aiheuttaa polymeerin haurastumista, säröilyä, värin muutoksia ja murtumisia. (Callister & Rethwisch 2007)

## 3.2 Dynaamiset rasitustekijät

Tässä kappaleessa käydään ensin läpi dynaamisten rasitustekijöiden vaikutuksia materiaaliin, jonka jälkeen esitellään nosturin komponentteihin tyypillisesti vaikuttavia dynaamisia rasitustekijöitä. Dynaamiset rasitustekijät voivat vaihdella, mutta niiden aiheuttamat vauriot tapahtuvat samojen ilmiöiden kautta. Olennaista on se, miten ja millainen kuormitus kappaleeseen vaikuttaa: kuinka suuri kuormitus on, onko kuormitus staattista vai syklistä ja missä olosuhteissa kuormitus tapahtuu. Väsymistä voi esimerkiksi tapahtua niin vaihtelevan kuormituksen, lämpösyklauksen kuin abrasiivisen kulumisen johdosta.

Dynaamisen kuormituksen kesto riippuu materiaalin lujuudesta. Vaurio syntyy, kun kuormitus ylittää komponentin lujuuden. Kuormitus laajimmassa merkityksessään sisältää kaikki komponenttiin jännityksiä aiheuttavat tekijät, kuten mekaanisen jännityksen, syklisen kuormituksen, jännitteen tai esimerkiksi lämpötilan vaikutuksesta aiheutuneet sisäiset jännitykset. Lujuus taas kattaa kaikki komponentin muutosta vastustavat fysikaaliset ominaisuudet. Näihin kuuluvat niin materiaalin kovuus ja lujuus kuin sulamispiste ja adheesiokin. (O'Connor & Kleyner 2012)

Komponentin lujuuden ylitys voi tapahtua kahdella eri tavalla. Ensimmäisessä tapauksessa komponenttiin kohdistuu ylikuorma. Toisessa taas komponentin lujuus laskee ensin dynaamisen kuormituksen vaikutuksesta, jonka jälkeen vaurio voi tapahtua huomattavasti komponentin alkuperäistä lujuutta pienemmällä kuormituksella. Materiaalin alkuperäistä lujuutta alentavia ilmiöitä ovat väsyminen, viruminen ja jännitysrelaksaatio. Kulumisen lujuutta laskeva vaikutus taas perustuu materiaalihäviöihin. (O'Connor & Kleyner 2012)

### 3.2.1 Vaikutukset materiaaliin

Tyypillisiä dynaamisten rasitustekijöiden aiheuttamia vaurioitumismenetelmiä ovat väsyminen, viruminen, jännitysrelaksaatio ja kulumisen eri muodot. Kaikki nämä johtavat

komponentin alkuperäisen lujuuden laskuun. Dynaamiset rasitukset aiheuttavat komponentissa säröilyä, materiaalihäviöitä, materiaaliominaisuuksien muutoksia ja lopulta murtumia. (O'Connor & Kleyner 2012)

Väsyminen on seurausta toistuvasta mekaanisesta jännityksestä. Jännityksen tulee olla materiaalin väsymisrajan suurempi, jotta väsymistä alkaa tapahtua. Komponentti murtuu, kun tämän väsymisrajan ylittäviä jännityssyklejä on riittävästi. Väsymismurtuma on usein tuhoisa, sillä murtumaa ei edellä makroskooppista plastista muodonmuutosta, vaan se tapahtuu arvaamattomasti ja vaadittava kuorma voi olla jopa myötölujuutta alhaisempi. Väsymismurtuma ydintyy tyypillisesti materiaalin epäjatkuvuuskohtaan, kuten materiaalissa olevaan sulkeumaan tai epäpuhtauteen. Myös kappaleen geometrian terävät kulmat tai liian pienet pyöristyssäteet voivat toimia jännityksen keskittäjinä. (Callister & Rethwisch 2007) Nosturien komponenteissa väsymismurtumat ovat tyypillisiä, sillä ne joutuvat usein vaihtelevien jännitysten alaisiksi. Yleisesti onkin arvioitu, että jopa 70 - 90 % kaikista koneissa esiintyvistä murtumistapauksista olisi väsymisen aiheuttamia murtumia (Lindroos et al. 1986).

Viruminen on korotetussa lämpötilassa tapahtuvaa aikariippuvaista plastista muodonmuutosta, kun komponentti on staattisen mekaanisen jännityksen alaisena. Metalleilla viruminen on merkittävää, kun lämpötila ylittää 0,4 kertaisesti absoluuttisen sulamislämpötilan. Tällaiset lämpötilat eivät ole kovin tyypillisiä nosturin käyttöympäristöissä. Muoveilla, erityisesti amorfisilla polymeereillä, sen sijaan virumista voi tapahtua jo huoneenlämpötilassa alle myötölujuuden olevien jännitysten alaisuudessa. (Callister & Rethwisch 2007)

Jännitysrelaksaatio on myös lämpötilasta ja ajasta riippuva ilmiö. Jännitysrelaksaatiossa vakiokuormituksella olevan komponentin jännitys laskee ajan funktiona. Tämä näkyy jännityksessä olevan muovikomponentin löystymisenä. Polymeerien viruminen ja jännitysrelaksaatio ovat hyvin samantapaisia ilmiöitä ja liittyvät polymeerien viskoelastiseen käyttäytymiseen. (Callister & Rethwisch 2007)

Kulumismekanismit voidaan jakaa neljään päätyyppiin: adhesiivinen kuluminen, abrasiivinen kuluminen, korroosiokuluminen ja väsymiskuluminen. Kulumismekanismeilla on lisäksi monia kulumistyyppejä, kuten esimerkiksi eroosiokuluminen. Kulumismuodot esitetään tyypillisesti erillisinä tapahtumina, vaikka käytännön tilanteissa ne esiintyvät usein peräkkäin tai samanaikaisesti. Yleisesti voidaan todeta, että adhesiivista kulumista esiintyy aina, kun laitteen voitelu on riittämätön pitämään pinnat irti toisistaan. Tästä huolimatta abrasiivinen kuluminen on edellä mainituista yleisin kulumismuoto teollisuuden sovelluksissa. (Lehtonen & Parikka 2000)

Adhesiivisessa kulumisessa kahden kontaktissa olevan ja toistensa suhteen liikkuvan pinnan topografian huiput hitsautuvat yhteen. Kappaleiden liikkeen jatkuessa edelleen, liitos murtuu ja materiaalia joko siirtyy kappaleesta toiseen tai jää liukupinnoille abrasiivisina

partikkeleina. Näin syntyvät partikkelit ovat hyvin kovia, sillä ne tyypillisesti karkaistuvat prosessissa. (Lehtonen & Parikka 2000)

Abrasiivinen kuluminen on pinnan naarmuuntumisesta johtuvaa kulumista. Kuluttavina tekijöinä voivat olla pinnalla tai kahden pinnan välissä olevat kovat partikkelit. Lisäksi naarmuuntumista voivat aiheuttaa kahden toistensa suhteen liikkuvan pinnan topografioiden huiput, kun pintojen välillä on riittävä kovuusero. Abrasiivinen kuluminen tapahtuu tyypillisesti leikkautumalla ja näin muodostuneet abrasiiviset partikkelit ovat muokkauslujittumisen ansiosta hyvin kovia. (Lehtonen & Parikka 2000)

Eroosiokulumisessa pinnan materiaalin irtoaminen johtuu liikkuvassa nesteessä tai kaasussa olevista partikkeleista. Partikkelin törmäyskulmasta riippuen materiaali voi joutua joko iskevän, leikkaavan tai jauhavan kulutuksen kohteeksi. Eroosiokulumisen vakavuus riippuu materiaaliominaisuuksista, väliaineen virtausnopeudesta sekä kuluttavien partikkelien ominaisuuksista, kuten koosta, muodosta ja kovuudesta. (Lehtonen & Parikka 2000)

### **3.2.2 Mekaaninen kuorma**

Nosturin tapauksessa mekaaninen kuorma muodostuu yhteisvaikutuksena nosturin oman rakenteen painosta ja nostettavasta painosta. Lisäksi tietyt ympäristön olosuhteet voivat lisätä nosturin kokonaiskuormaa. Tällaisia tekijöitä ovat esimerkiksi kova tuuli, matala ilmanpaine tai mahdollinen lumikuorma. Nosturin maksimikuormaa on laskettava, kun nosturin toimintaympäristö on yli 1000 metriä meren pinnan yläpuolella, jotta rakenteeseen kohdistuva kokonaisrasitus ei nouse suunniteltua maksimikuormaa korkeammaksi. Samoin tulee menetellä kovan tuulen tai suuren lumikuorman tapauksessa.

Nosturin komponenttien mekaaninen rasitus voi olla veto-, puristus- tai leikkauskuormitusta. Mekaaninen rasitus voi aiheuttaa kappaleen murtumisen, jos se ylittää kappaleen murtolujuuden. Väsymisvaurio on kuitenkin yleisin mekaanisen kuorman aiheuttama vikaantumismuoto niin nosturin mekaanisissa kuin sähköisissä komponenteissa. Lisäksi mekaaninen kuorma voi aiheuttaa virumista ja jännitysrelaksaatiota sekä kulumista kaikissa sen eri muodoissa. (Lindroos et al. 1986; O'Connor & Kleyner 2012)

Akselin väsymismurtuma on hyvä esimerkki mekaanisen kuormituksen aiheuttamasta vauriosta nosturissa. Akseli toimii voiman välittäjänä muille mekaanisille komponenteille, jolloin siihen kohdistuu väsyttävää vääntö- ja taivutuskuormitusta. (Zambrano et al. 2014) Sähköisissä komponenteissa yleisiä väsymisvaurioita ovat pintaliitoskomponenttien juoteliitosten tai joko painavien tai huonosti tuettujen komponenttien liitosten väsyminen. (O'Connor & Kleyner 2012)

Kuormitusten määrittäminen nosturin eri komponenteille voi olla vaikeaa, sillä esimerkiksi köyteen vaikuttavat erisuuruiset voimat sen ollessa vapaana tai kiertyneenä köysipyörän ympärille, vaikka molemmissa tilanteissa kuorma olisikin sama. Köysi on olennainen osa tarkasteltaessa nosturin luotettavuutta. Köysi kokee elinikänsä aikana paljon väsyttävää kuormitusta. Tavallisesti köyden vaihtoväli pyritään määrittämään niin, ettei vaarallisia köyden vaurioitumistilanteita pääse tapahtumaan. Vaihtovälin määrittäminen on kuitenkin haastavaa, sillä kuormat ja nostotaajuudet vaihtelevat suuresti eri sovelluskohteiden välillä.

Nosturissa on vaihdettavien komponenttien lisäksi osia, joiden oletetaan kestävän koko nosturin käyttöiän. Tällaisia ovat esimerkiksi pääkannattaja, nosturirata ja päätykannattaja. Nämä joutuvat toimintaympäristössään yhtälailla väsyttävän mekaanisen kuorman alaisiksi. Väsyttävä kuorma voi olla vaihtelevaa vertikaalista, sivuttaissuuntaista tai isku-kuormitusta. Nosturin tapauksessa vertikaalisesta kuormasta käytetään usein termiä pyöräkuorma. Esimerkiksi siltanosturin nosturiradan pyöräkuorma muodostuu vaunun ja nostettavan kuorman painosta. Pyöräkuorma on suurimmillaan nosturin nostaessa sen maksimikuormaa niin, että vaunu on sillan päässä nosturiradan vieressä. Sivuttaissuuntaisia kuormia taas syntyy esimerkiksi nosturin ja kuorman kiihdyttäessä tai hidastaessa tai sivuttaissuuntaisessa nostamisessa. Iskumainen kuormitus voi olla kuorman nostamisen yhteydessä tapahtuvan kiihdytyksen tai putoavan kuorman yhtäkkisen jarrutuksen aiheuttamaa tai syntyä esimerkiksi pyörien ylittäessä epätasaisuuden nosturiradalla. (Fisher & Van de Pas 2002) Iskun, värinän ja kiihtyvyyden vaikutuksia nosturin komponentteihin on selvitetty tarkemmin kappaleessa 3.2.3 *Isku, värinä ja kiihtyvyys*.

Viruminen ja jännitysrelaksaatio muodostuvat ongelmaksi lähinnä polymeeri- ja elektronikkakomponenteissa. Esimerkiksi tiivisteen tiivistyskyky voi heiketä näiden ilmiöiden johdosta. Elektronikkakomponentit ovat useimmiten joko omasta toiminnastaan tai toimintaympäristöstään johtuen korotetussa lämpötilassa. Tämä on juuri virumisen ja jännitysrelaksaation kannalta haastavaa, sillä korotetuissa lämpötiloissa vikaantumiseen vaadittava jännitys on hyvin pieni. (O'Connor & Kleyner 2012)

### 3.2.3 Isku, värinä ja kiihtyvyys

Iskun ja kiihtyvyyden voidaan ajatella olevan värinän alalajeja. Tyypillisiä värinän aiheuttamia vaurioitumismuotoja ovat materiaalin murtuminen ja väsyminen. Värinä on erityisen haitallista sähkökomponenteille, jotka tyypillisesti altistuvat värinälle niin testauksen kuin käytön yhteydessä (PD-EC-1101 2014). Tämän lisäksi kulumisvauriot ovat yleisiä. Kulumisvaurioita voi esiintyä esimerkiksi laakereissa ja erilaisissa liittimissä. Värinä voi aiheuttaa myös kiinnittimien löystymistä sekä meluhaittaa. (O'Connor & Kleyner 2012)

Värinää voi esiintyä joko tasaisella tai vaihtelevalla taajuudella. Kaiken kaikkiaan komponenttiin tai laitteeseen kohdistuva värinä voi olla monimutkainen yhdistelmä mekaa-

nista, sähkömekaanista, akustista, vääntö- tai pyörimisvärähtelyä. Sinimuotoisen värähtelyn kannalta oleellisia ovat värähtelyn taajuus (Hz), siirtymä (mm) ja nopeuden huipparvo (m/s). (O'Connor & Kleyner 2012)

Jokaisella rakenteella on vähintään yksi ominaistaajuus. Ominaistaajuus on olennainen, sillä siirtymä kasvaa tärinän tapahtuessa tällä taajuudella. Ominaistaajuus on suoraan verrannollinen rakenteen jäykkyyteen ja kääntäen verrannollinen inertiaan eli muutosta vastustavaan voimaan. Rakenteen tulee olla riittävän jäykkä, jotta sen ominaistaajuus on sisääntulovärähtelyn taajuutta korkeampi ja välttää värähtelyn resonanssivaikutuksilta. (PD-EC-1101 2014; O'Connor & Kleyner 2012) Esimerkiksi nosturin teräsrakenteiden suunnittelusääntönä on, että pystysuuntaisen ominaistaajuuden on oltava yli 2,0 Hz (ISO 22986 2007).

Nosturin komponentit voivat altistua iskuille ja tärinälle niin valmistuksen, kuljetusten, itse käytön kuin huollon yhteydessä. Maantiekuljetuksessa tärinää syntyy esimerkiksi epätasaisesta tiestä tai ajoneuvon huonosta jousituksesta johtuen. Rautatiekuljetuksessa taas epätasaisuudet raiteissa tai niiden liitoskohdissa aiheuttavat tärinää. Käytön aikana tärinää syntyy tyypillisesti edestakaisin liikkuvien tai pyörivien laitteistojen aiheuttamana. (O'Connor & Kleyner 2012) Esimerkiksi vaunuun kiinnitetyn sähkökaapin sisällä olevat komponentit altistuvat tärinälle vaunun liikkeessä radalla tai nostimen nostaessa kuormaa. Toisaalta myös sähkölaite voi aiheuttaa tärinää tai iskumaista kuormitusta toisille sähkölaitteille. Esimerkiksi kontaktorin kytkeytyessä päälle ja pois, se tuottaa iskumaisen jännityksen. Tämä iskukuormitus välittyy kiinnityskiskoon ja siitä edelleen muihin samaan kiskoon kiinnitettyihin komponentteihin. Ajit et al. (2010) toteavat, että tärinä on erityisen haitallinen sähkökomponenteille yhdistettynä lämpösyklaukseen. Näiden yhteisvaikutus kiihdyttää merkittävästi sähkökomponenttien vikamekanismeja. Myös valmistuksen ja huollon yhteydessä syntyy usein iskukuormitusta, kun komponentteja joko irrotetaan tai asennetaan paikoilleen. Laakerit ovat nosturin mekaanisista osista yksi herkimmin iskuista ja tärinästä vikaantuvia komponentteja.

### 3.2.4 Virta, jännite ja teho

Sähköiset komponentit voivat vikaantua edellä kuvattujen lisäksi myös sähköisten rasitusten vaikutuksesta. Tärkeimmät sähköiset rasitustekijät ovat virta, teho ja jännite. Sähköisten rasitusten aiheuttamat vauriot voivat tulla esille komponentissa heti altistumisen jälkeen tai vasta pitkienkin aikojen jälkeen. (Ajit et al. 2010; O'Connor & Kleyner 2012)

Virta aiheuttaa johtimen lämmön nousua, joka pahimmillaan voi johtaa sen palamiseen. Tätä ominaisuutta käytetään myös suojaamaan muita komponentteja liian suurelta virralta ja sen aiheuttamilta lämpöhaitoilta. Lämpö voi kuitenkin siirtyä johtumisen avulla muihin komponentteihin tai eristemateriaaleihin, jolloin nämäkin voivat vaurioitua. Sähkövirta synnyttää magneettikenttiä, jotka oskilloidessaan voivat aiheuttaa häiriöitä komponentin toiminnassa, melua ja sähkömekaanista värähtelyä. Lisäksi korkea virta voi ajan myötä

aiheuttaa muutoksia sähkökomponentin parametriarvoissa, kuten resistanssissa. Korkealla lämpötilalla on kiihdyttävä vaikutus myös tähän ilmiöön. (PD-EC-1101 2014; O'Connor & Kleyner 2012)

Korkean virran ja jännitteen vaikutukset materiaaliin ovat hyvin samantyyppisiä ja usein niitä on vaikea erottaa toisistaan. Korkea jännite voi olla joko sähköstaattisen purkauksen, ESD:n (*Electrostatic discharge*), tai ylijännitteen, EOS:n (*Electrical overstress*), aiheuttamaa. Korkea jännite voi aiheuttaa valokaaren muodostumisen avoimien kontaktien välille esimerkiksi releissä ja kytkimissä. Se voi myös aiheuttaa läpilyöntejä. Esimerkiksi läpilyönti kondensaattorin levyjen välillä on tyypillinen kondensaattorin vikamuoto. (Ajit et al. 2010; O'Connor & Kleyner 2012) Toinen esimerkki läpilyönnin seurauksista on sähkömoottorin laakerien vaurioituminen, jos virta pääsee kulkemaan niiden läpi (SFS-ISO 15243).

ESD aiheuttaa korkean jännitepiikin, kun kahden eri potentiaalissa olevan kappaleen jännite-ero purkautuu äkillisesti. Purkautuminen voi tapahtua joko kosketuksen välityksellä tai staattisen magneettikentän indusoimana ihmisen ja laitteen tai kahden laitteen välillä. ESD voi aiheuttaa vikaantumista joko korkean virran tiheyden tai suuren sähkökentän vaikutuksesta. Molemmissa tapauksissa vikaantuminen liittyy ylimääräiseen lämmön tuontiin, joka voi johtaa muun muassa metallijohtimien höyrystymiseen. Vikaantuminen voi olla välitön tai se voi tulla näkyviin vaihteittain niin, että lopullinen vaurioituminen tapahtuu vasta vuosien käytön jälkeen. Ilmiön havaitsemista vaikeuttaa usein se, että jo suhteellisen pienet jännitepurkaukset voivat vaurioittaa sähkökomponentteja. Elektrooniikkalaitteelle jo muutaman sadan voltin sähköpurkaus voi olla kohtalokas, kun taas ihminen tuntee tavallisesti vasta yli 3 000 V sähköstaattiset purkaukset. ESD:n mahdollisia vaikutuksia komponentissa, ennen sen lopullista vikaantumista, ovat muun muassa toimintakyvyn heikkeneminen ja tilapäiset toimintahäiriöt. (Ajit et al. 2010; O'Connor & Kleyner 2012)

EOS kattaa tilanteet, joissa sähkökomponentti altistuu sille asetettujen rajojen ulkopuolella oleville jännitteille tai virroille. EOS voi johtua esimerkiksi hetkellisestä korkeasta jännitteestä voimalinjoissa tai viasta virtapiirissä. Myös EOS:n tapauksessa vikaantuminen on seurausta ylimääräisestä lämmön tuonnista. (O'Connor & Kleyner 2012)

Kuten virta ja jännite, myös teho aiheuttaa lämmön nousua. Komponentin kokonaislämpö muodostuu sen itse toiminnallaan aiheuttamasta lämmöstä sekä ympäristön lämpötilasta. Jos kokonaislämpö ylittää komponentin sietokyvyn, puhutaan ylikuumenemisesta. Esimerkiksi vastukset ja kondensaattorit voivat vikaantua tehon aiheuttaman ylikuumenemisen johdosta. Pitkällä aikavälillä tehon aiheuttamat rasitukset voivat aiheuttaa komponentin parametriarvojen, kuten resistanssin ja kapasitanssin, muutoksia. Vaihteleva teho voi puolestaan aiheuttaa lämpösyklauksen kautta myös väsymistä. (O'Connor & Kleyner 2012)



### 3.3 Rasitustekijöiden yhteisvaikutukset

Monilla rasitustekijöillä on yhteisvaikutuksia. Tämä tekee sekä testauksen että luotettavuuden analysoinnin haastavaksi, sillä ei riitä, että tarkastellaan vain yksittäisiä rasitustekijöitä. Joskus kaikkien läsnä olevien rasitustekijöiden määrittäminen voi olla hankalaa. Tätä vaikeuttaa edelleen se, että jo yhden teollisuuslaitoksen sisällä voi olla useita erilaisia mikroilmastoja ja näin ollen myös näissä vaikuttavat rasitustekijät (kuten ilmankosteus ja epäpuhtaudet) vaihtelevat. Nosturien käyttökohteet kattavat hyvin kirjavan joukon erilaisia teollisuuden laitoksia ympäri maailmaa, joten erilaisten rasitustekijöiden yhdistelmiä on lukemattomia.

Rasitustekijöillä voi olla joko toisiaan vahvistava tai heikentävä vaikutus. Esimerkiksi metallikomponentin pinnalle tiivistynyt kondensoitunut vesi ei yksinään korrodoi sitä. Korroosiolle suosiollinen elektrolyytti muodostuu, kun sopivia ilman epäpuhtauksia liukenee tähän veteen. Toisaalta taas, jos auringon säteily haihduttaa veden komponentin pinnalta, korrodoituminen pysähtyy. Tyypillisesti useiden rasitustekijöiden yhteisvaikutus on tuhoisampi kuin samojen rasitustekijöiden vaikutukset erikseen.

Lisäksi erilaiset rasitustekijät voivat vaikuttaa komponenttiin tai laitteeseen aika-akselilla kahdella eri tapaa: yhtä aikaa tai peräkkäin. Esimerkiksi nosturin käyttöympäristössä valitseva ilmasto muodostuu useista samaan aikaan vaikuttavista rasitustekijöistä, joiden ehkä merkittävin yhteisvaikutus muodostuu ilmankosteudesta, epäpuhtauksista ja lämpötilasta. Tämä kolmen rasitustekijän kokonaisuus määrittelee hyvin pitkälti ympäristön korrodoivuuden. Peräkkäin vaikuttavista rasitustekijöistä esimerkkinä voidaan mainita kuljetuksen aikainen tärinä ja tämän jälkeen altistuminen käyttöympäristön rasitustekijöille. Tärinä voi muun muassa kuluttaa korroosiolta suojaavaa pinnoitetta ja näin altistaa komponentin suojaamattoman pinnan korroosiolle myöhemmin sen käyttöympäristössä.

Rasitustekijöiden yhteisvaikutusten kartoitus kannattaa aloittaa nosturin elinkaaren eri käyttöympäristöjen rasitustekijöiden kartoituksella: mitkä rasitustekijät vaikuttavat valmistuksen, kuljetuksen, varastoinnin ja käytön yhteydessä. Tätä asiaa käsitellään tarkemmin kappaleessa 5 *Luotettavuuden varmistus käytännön sovelluksissa*. Ilmastollisten rasitustekijöiden merkittävin yhteisvaikutus on korroosio. Korroosion lisäksi lämpötilan ja kosteuden yhteisvaikutus on merkittävä erityisesti sähkökomponenttien kohdalla. Dynaamisten rasitustekijöiden yhteisvaikutus muodostuu eri rasitustekijöiden kuormitusten summasta. Kokonaiskuormaan tulee huomioida tilanteesta riippuen kaikki siihen vaikuttavat kuormat. Mahdollisia kuormia nosturisovelluksissa ovat muun muassa itse vaunun paino, nostettavan kuorman paino, tuuli, lumikuorma, liikkeestä johtuva tärinä tai kiihtyvyys sekä erilaiset sähköiset jännitykset.

Korroosio on Cramerin (2006) mukaan rasitustekijöiden yhteisvaikutuksista eniten huolto- ja ylläpitokuluja aiheuttava tekijä. Siinä tärkeimpinä rasitustekijöinä ovat kosteus,

lämpötila ja ilman epäpuhtaudet. Nämä rasitustekijät edistävät korroosiota metallimateriaaleissa muun muassa mahdollistamalla galvaanisten kennojen muodostumisen eri potentiaaleissa olevien metallien välille. Epämetallien kohdalla kosteus ja ilmassa oleva suola muodostavat pintakalvoja, jotka puolestaan voivat aiheuttaa vuotoja, eristeiden heikkenemistä ja muutoksia läpilyöntiominaisuuksissa (dielectric properties). (PD-EC-1101 2014)

Korroosio voi materiaalihäviöiden, korroosiotuotteiden muodostumisen ja ulkonäön heikkenemisen lisäksi aiheuttaa muutoksia kappaleen ennustetussa väsymisen kestossa. Tällöin korroosion vaikutuksesta syntynyt vaurio nopeuttaa väsymisvaurion syntyä syklisen kuormituksen alaisuudessa. Korroosio voi myös edesauttaa kappaleen murtumista murtolujuutta alhaisemmilla jännityksillä. Metallien kohdalla ilmiöstä puhutaan nimellä jännityskorroosio. Muoveilla vastaava ilmiö on jännityssäröily. Olennaista on se, että jännitys yksinään ei aiheuta vauriota vaan vaaditaan myös kemiallinen rasitus. (Cramer 2006)

Sähkökomponenttien korroosio on suuresti riippuvainen lämpötilasta, kosteudesta, biologisesta kasvustosta, pölystä ja suolasumusta. Shokit ja värinä luovat lisähaastetta korroosion suojaukselle, sillä pinnoitteet saattavat näiden vaikutuksesta kulua pois. Tyypillinen korroosion aiheuttama vikaantuminen sähkökomponenteissa on kontaktien hapettuminen. Korroosiotuotteet voivat lisäksi aiheuttaa oikosulkuja. (Cramer 2006; O'Connor & Kleyner 2012)

Ilmastollisilla ja dynaamisilla rasituksilla on myös yhteisvaikutuksia. Esimerkiksi eroosio- ja korroosio on liikkuvassa nesteessä tai kaasussa olevien partikkelien ja korroosion yhteisvaikutus. Jännityssäröily on muoveille ominainen ilmiö, joka on seurausta kemiallisen rasituksen ja jännityksen vaikutuksesta. Jos kemiallinen rasitus poistetaan, säröä ei synny pelkästään jännityksen vaikutuksesta. Jännitys kattaa tässä tapauksessa niin mekaaniset kuin kappaleen sisäisetkin jännitykset. Käytännössä kaikilla muoveilla on jokin niille ominainen kemiallinen ympäristö, jossa jännityssäröilyä tapahtuu. (Duvall 2002)

### 3.4 Vikaantuminen

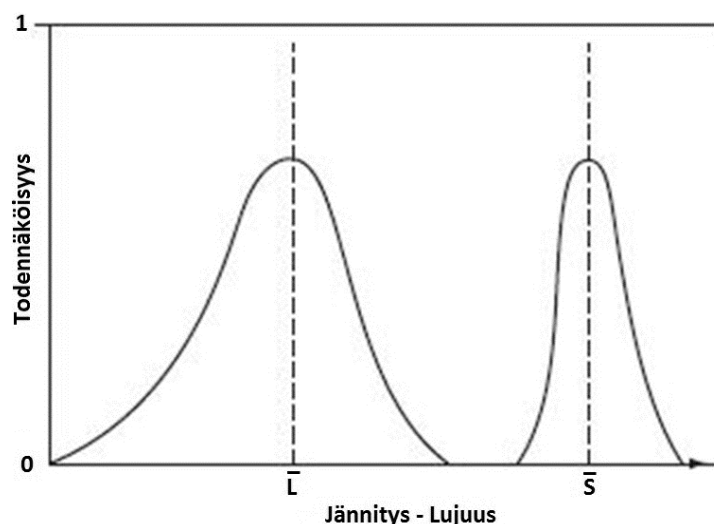
Yksinkertaisuudessaan tuote lasketaan vikaantuneeksi, kun se ei enää tee sille määritellyjä toimintoja vaaditulla suorituskykytasolla. Todellisuudessa vikaantuminen voi olla paljon haastavampaa määritellä. Tuote voi vaurioitua monella tavalla ja vikaantumisen määritelmästä riippuu, koska tuote todella lasketaan vikaantuneeksi. (Birolini 2010; O'Connor & Kleyner 2012) Lasketaanko tuote vikaantuneeksi, kun dynaamiset jännitykset ovat ylittäneet myötölujuuden eli kappale on muokkautunut plastisesti ja menettänyt alkuperäisen muotonsa? Vai lasketaanko se vikaantuneeksi vasta, kun jännitykset ovat ylittäneet murtolujuuden eli kappaleeseen on muodostunut särö tai murtuma? Entä onko tuote vikaantunut, jos sen kotelosta on murtunut pala pois, mutta itse laite toimii edelleen moitteettomasti?

Tuotteen vaurioton toiminta-aika (*Failure-free time/Failure-free operating time*) on kiinnostava luotettavuuteen vaikuttava satunnaismuuttuja. Tyypillisesti se on suhteellisen pitkä, mutta poikkeustilanteissa se voi olla hyvin lyhytkin. Vikaantumisen määrittämisessä käytetään muun muassa seuraavia termejä: vikamuoto (*Failure mode*), syy (*Failure cause*), vaikutus (*Failure effect*) ja vikamekanismi (*Failure mechanism*). (Birolini 2010)

Vikamuoto on paikallinen vian ilmenemismuoto, kuten haurasmurtuma tai särö mekaanisessa komponentissa tai vastaavasti avoin piiri tai oikosulku elektroniikkakomponentissa. Vian syy voi olla sisäinen tai ulkoinen. Sisäinen vian syy tarkoittaa komponentin sisäistä heikkoutta kestää siihen kohdistettuja jännityksiä. Tällaisia voivat olla materiaalliviat kuten sulkeumat ja epäpuhtaudet. Toisaalta sisäinen syy voi olla myös seurausta tuotteen prosessoinnista. Esimerkiksi tuotteen valmistuksen tai työstön yhteydessä siihen voi syntyä sisäisiä jännityksiä, jotka heikentävät sen kestoa ulkoisia kuormituksia vastaan. Vikaantumiseen johtavat ulkoiset jännitykset voivat olla peräisin tuotteen väärinkäytöstä niin valmistuksen, varastoinnin kuin itse käytön yhteydessä. Myös tuotteen suunniteltu käyttö voi johtaa vikaantumiseen kulumisen tai väsymisen kautta. Vaikutus kuvaa vikamuodon välitöntä seurausta. Sen vakavuus voi vaihdella merkityksettömästä kriittiseen ja koska se voi aiheuttaa vaurioitumista edelleen, käytetään usein myös jakoa primäärisiin ja sekundäärisiin vaikutuksiin. Vikamekanismi taas on fysikaalinen, kemiallinen tai jokin muu vikaantumiseen johtava prosessi, kuten väsyminen, korroosio, dielektrisen lujuuden lasku tai sähkökemiallinen migraatio. (Birolini 2010, Espec Technology Report No. 10 2014)

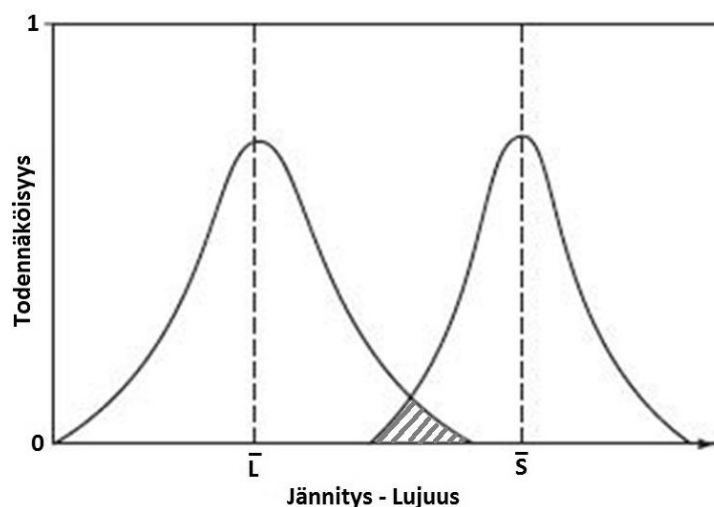
Vikaantumisen syiden tunteminen luo perustan sen ehkäisemiselle ja luotettavuuden arvioimiselle. Kaikkien mahdollisten syiden tunteminen on kuitenkin mahdotonta. Epävarmuutta lisää myös se, että tuotteen lujuudelle ja siihen kohdistuville jännityksille ei voida antaa absoluuttisia arvoja. Lujuuden ja jännityksen suhdetta vikaantumiseen havainnollistetaan usein jakaumien ja niiden päällekkäisyyksien avulla. Lujuuden jakauma kuvaa koko tarkasteltavan populaation lujuuden todennäköisyysjakaumaa. Jännityksen jakauma puolestaan kuvaa tarkasteltavaan populaatioon kohdistuvien jännitysten todennäköisyysjakaumaa. (O'Connor & Kleyner 2012)

Vikaantuminen tapahtuu, jos näissä jakaumissa on päällekkäisyyksiä. Kun tuotteen lujuus ja siihen kohdistuvat jännitykset tunnetaan, voidaan niitä hyödyntää suunnittelussa niin, ettei tällaista tilannetta tule. Ideaalitilanteessa jakaumien hajonta on mahdollisimman pieni ja niiden välillä on selvä ero, kuten kuvassa 3.



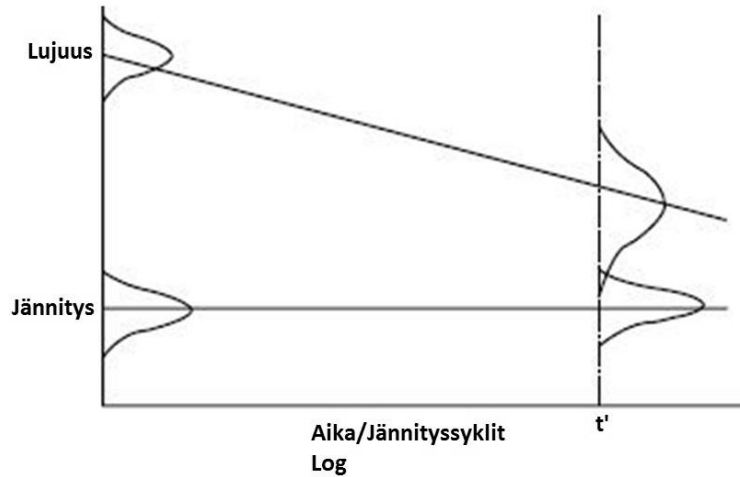
**Kuva 3.** Jännitys-lujuus -jakaumat erillään, jolloin vikaantumista ei tapahdu. Jännitys jakauma (Load,  $L$ ) on kuvassa vasemmalla ja lujuusjakauma (Strength,  $S$ ) oikealla. (O'Connor & Kleyner 2012)

Suunnittelussa voidaan lisäksi käyttää erilaisia varmuuskertoimia, jotta jakaumille saadaan lisäetäisyyttä. Aina tämäkään ei riitä, vaan poikkeustilanteissa (esimerkiksi ylikuormitustilanteissa) nämä jakaumat voivat mennä limittäin, kuten kuvassa 4. Jos nyt kuormitus sattuu olemaan jakauman yläpäässä ja komponentin lujuus jakauman alapäässä, komponentti vikaantuu.



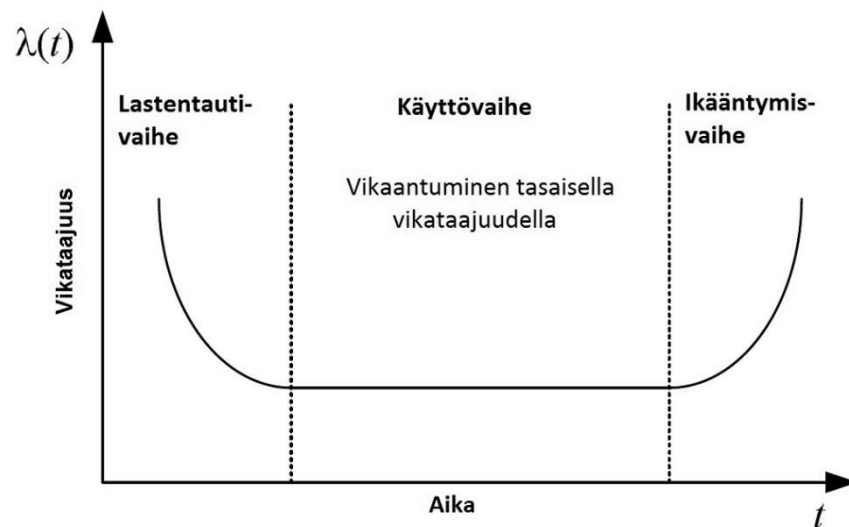
**Kuva 4.** Jännitys-lujuus -jakaumat limittäin: vikaantuminen on mahdollinen viivoitetun pinta-alan olosuhteissa (O'Connor & Kleyner 2012)

Toisaalta on otettava huomioon tuotteen lujuuden mahdollinen lasku ajan funktiona. Tätä on havainnollistettu kuvassa 5. Kuvasta nähdään, että alkuperäisessä tilanteessa lujuuden ja jännityksen jakaumat ovat selvästi erillään. Ajan myötä lujuus kuitenkin laskee ja sen hajonta kasvaa. Jännityksen pysyessä samana, jakaumat menevät lopulta päällekkäin ja vikaantuminen tapahtuu. (O'Connor & Kleyner 2012)



Kuva 5. Lujuuden muutos ajan funktiona (O'Connor & Kleyner 2012)

Tarkasteltaessa isoa populaatiota tilastollisesti samanlaisia, mutta toisistaan riippumattomia, näytteitä, voidaan todeta vikataajuuden noudattavan niin kutsuttua kylpyamme-käyrää (*Bathtub curve*). Siinä vikataajuutta tarkastellaan ajan funktiona. Kylpyamme-käyrä on esitetty kuvassa 6. Kuvasta nähdään, että vikataajuus on suuri sekä alussa että lopussa. (Birolini 2010; Espec Technology Report No. 1 2014)



Kuva 6. Vikaantumisen kylpyammekäyrä vaihdettavalle komponentille tai systeemille (Cristaldi et al. 2011)

Kylpyammekäyrässä tuotteen elinkaari voidaan jakaa vikataajuuden perusteella kolmeen eri vaiheeseen: lastentautivaiheeseen, käyttövaiheeseen ja ikääntymisvaiheeseen. Lastentautivaiheessa vikataajuus on korkea, mutta tyypillisesti se laskee jyrkästi ajan funktiona. Korkeaa vikataajuutta selittävät satunnaiset heikkoudet niin materiaalissa, itse komponentissa kuin valmistusprosessissakin. Nämä heikkoudet johtavat tavallisesti vikaantumiseen hyvin nopeasti käytön alkaessa. Tuotteille tehdään usein erilaisia käyttöönottotestejä (screening ja burn-in -testit), jotta estettäisiin viallisten tuotteiden markkinoille pääsy. Lastentautivaihetta seuraa käyttövaihe, jonka aikana vikaantuminen on suhteellisen tasaisista. Tällöin vikaantumista aiheuttavat erilaiset käyttöön liittyvät syyt, esimerkiksi väärinkäytökset tai vaihtelevat ympäristöolosuhteet. Ikääntymisvaiheessa vikataajuus alkaa

jälleen nousta väsymisestä, kulumisesta, korroosiosta, sähkökemiallisesta migraatiosta ja muista vastaavista käytöstä johtuvista syistä. (Birolini 2010; O'Connor & Kleyner 2012)

Kylpyammekäyrää käytetään erityisesti sähkökomponenttien vikaantumisen havainnollistamiseen, mutta se soveltuu yhtälailla mekaanisille ja sähkömekaanisille komponenteille. On kuitenkin huomioitava, että vikaantuminen ei aina noudata tätä kaavaa. Kaikki edellä kuvatut eri vaiheet voivat esiintyä myös erillisinä tai muodostaa erilaisia yhdistelmiä keskenään. Lisäksi käyttöympäristön olosuhteet vaikuttavat suuresti vikataajuuteen. (Birolini 2010; O'Connor & Kleyner 2012)

## 4 LUOTETTAVUUDEN VARMISTUSMENETELMÄT

Tämän luvun ensimmäisessä osiossa *4.1 Luotettavuus ja sen varmistaminen* esitetään luotettavuuden käsite ja luotettavuustekniikassa yleisimmin käytetyt mittarit. Mittareita on paljon ja niiden määritelmät vaihtelevat hieman lähteestä riippuen. Tässä esiteltäviä mittareita ovat luotettavuus, vikaantuminen ja käytettävyys.

Ympäristöolosuhteiden vaikutuksia eri komponentteihin tarkastellaan tyypillisesti näitä simuloivien olosuhdetestien avulla. Olosuhdetestit kattavat niin ilmastolliset kuin dynaamiset testit. Testit voidaan jakaa vikaantumishakuisuuden suhteen kahteen kategoriaan. Näistä kerrotaan tarkemmin osiossa *4.2 Testaus*. Erityisesti sähkökomponenttien kohdalla suositetaan olosuhdetestausta, sillä niiden suuri pakkaustiheys ja integroituminen erilaisiin laitteisiin vaihtelevissa olosuhteissa luovat haastavat olosuhteet luotettavuudelle.

Toisinaan ympäristön vaikutusten selvittäminen voi olla hankalaa testauksen avulla. Tähän vaikuttavat vaihtelevat käyttöympäristöt ja sovelluksen ominaisuudet. Standardi- ja prosessinosturit ovat järeitä laitteita testattavaksi, jolloin niiden testaus vaatii paljon aikaa, rahaa ja muita resursseja. Tämän lisäksi nosturi (erityisesti prosessinosturi) voi olla täysin asiakkaalle räätälöity yksittäiskappale. Usean testinäytteen vaativa olosuhdetestaus muodostuu tällöin mahdottomaksi ja tarvitaan muita keinoja. Kappaleessa *4.3 Analysointimenetelmät* esitellään erilaisia analysointimenetelmiä luotettavuuden varmistamiseen.

### 4.1 Luotettavuus ja sen varmistaminen

Luotettavuustekniikan kirjallisuuden (Ajit et al. 2010; Birolini 2010; Cristaldi et al. 2011; O'Connor & Kleyner 2012) yleisen määritelmän mukaan luotettavuus on todennäköisyys, että hyödyke suorittaa sille ennalta määritetyt toiminnot toimintaympäristössään tietyn ajanjakson ajan ilman vikaantumista. Birolini (2010) antaa luotettavuudelle tämän lisäksi laadullisen ja määrällisen määritelmän. Laadullisen määritelmän mukaan luotettavuus kuvaa tuotteen kykyä pysyä toiminnallisena. Määrällinen määritelmä taas on todennäköisyys, että toiminnallisia keskeytyksiä ei tapahdu tietyllä tarkastelujaksolla.

Luotettavuus huomataan tavallisesti, kun sitä ei ole. Epäluotettavuus luo kustannuksia valmistajalle muun muassa materiaalihäviöiden (screening testit) ja takuuaikana tapahtuvien vikaantumisten kautta. Jos tuote vikaantuu takuuaikana, valmistaja joutuu korvaamaan tuotteen ja asiakkaalle syntyy lisävaivaa tuotteen toimittamisesta takuukorjaukseen. Epäluotettavuuden todelliset kustannukset eivät tyypillisesti rajoitu pelkästään laatupuutosten aiheuttamien vahinkojen korjaamiseen ja korvaamiseen, vaan usein yritykselle kallemmaksi tulee maineen menetys. Tyytymätön asiakas ei osta seuraavaa tuotetta enää

samalta valmistajalta ja kertoo käyttäjäkokemuksistaan todennäköisesti myös tuttavilleen. (O'Connor & Kleyner 2012) Nosturin tapauksessa epäluotettavuus tarkoittaa pahimmillaan taakan putoamista, jolloin seuraukset voivat olla hyvin vakavat kattaen henkilö- ja materiaalivahingot.

Luotettavuus ja laatu liittyvät tiiviisti yhteen. Tuotteen hyvyyttä arvioitaessa puhutaan usein sen laadusta tai laadukkuudesta. Laadun määritelmän mukaan tuotannon tulisi olla mahdollisimman tasalaatuista ja tuotteiden täyttää niille määritellyt laatukriteerit. Asiakkaan näkökulmasta laadukkaan tuotteen tulee täyttää sille asetetut odotukset ja olla siihen käytetyn pääoman arvoinen. Laatu määrittelee siis hetkellisen arvon toiminnallisuuden ja suorituskyvyn perusteella. Monien hyödykkeiden, kuten nosturien, kohdalla luotettavuus muodostuu vielä laatuakin tärkeämmäksi kriteeriksi. Tämä johtuu siitä, että tuote, joka täyttää laatukriteerit ostohetkellä ja vain vähän aikaa sen jälkeen, on harvoin hyödyllinen asiakkaalle. Luotettavuus ottaa kantaa rasitusten keston aikariippuvuuteen eli siihen kuinka kauan laatukriteereissä määritellyt ominaisuudet ovat ylläpidettävissä. Pidempiaikainen altistuminen ympäristön rasitustekijöille voi aiheuttaa muun muassa väsymistä, kulumista, korroosiota ja sähköisten ominaisuuksien muutoksia. On syytä muistaa, että luotettavuus on vahvasti riippuvainen käyttöympäristön rasitustekijöiden suuruudesta. (Ajit et al. 2010; Birolini 2010; Espec Technology Report No. 1 2014)

Luotettavuustekniikka on joukko menetelmiä laadun ylläpitämiseksi. Sen tärkeimmät tehtävät voidaan jakaa neljään. Näistä ensimmäinen, ja samalla myös tärkein, on estää tai vähentää vikaantumisen todennäköisyyttä tai tiheyttä. Toiseksi, jos vikaantumisesta kuitenkin tapahtuu, pyritään tunnistamaan ja poistamaan vikaantumiseen johtaneet tekijät. Kolmantena, mikäli näiden poistaminen ei ole mahdollista, selvitetään keinot, miten vikaantumisten kanssa tullaan toimeen. Neljäs tehtävä on luoda menetelmiä uusien tuotteiden luotettavuuden arvioimiseen. Kaikkien vaiheiden suorittaminen vaatii hyvää tuntemusta käyttöympäristön rasitustekijöistä ja niiden yhteisvaikutuksista. Lisäksi vaaditaan tuntemusta komponenttien materiaaleista ja rakenteista, jotta voidaan arvioida tunnettujen rasitustekijöiden todellisia vaikutuksia komponentteihin. (O'Connor & Kleyner 2012)

Luotettavuustekniikka määrittelee luotettavuuden usein erilaisten numeeristen mittareiden avulla. Tällaisia mittareita ovat luotettavuus, vikatiheys ja käytettävyyys. Luotettavuustekniikka poikkeaa monista muista tekniikan aloista sen sisältämän suuren epävarmuuden vuoksi. Epävarmuus johtuu siitä, että vikaantumisajankohtaa ja taajuutta ei voida ennustaa tarkasti. Vikaantuminen voi tapahtua koska tahansa ja ainoastaan sen todennäköisyys vaihtelee. Tämä on otettava huomioon tuloksia arvioitaessa. (O'Connor & Kleyner 2012)

Luotettavuustarkastelun yhteydessä komponentit jaetaan tyypillisesti vaihdettaviin ja korjattaviin komponentteihin, sillä mittarit soveltuvat näille eri tavalla. Vaihdeettavalla komponentilla tarkoitetaan komponenttia, joka vikaantuessaan korvataan kokonaan uu-

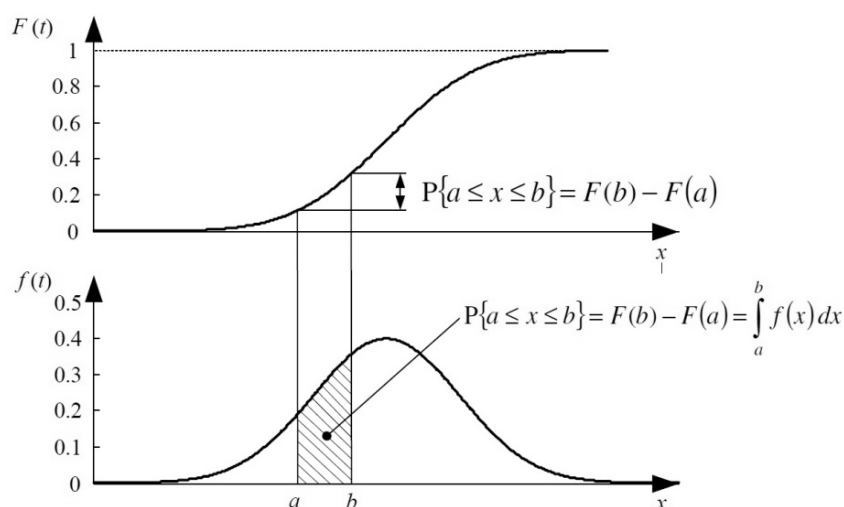


della vastaavanlaisella komponentilla. Korjattavalla komponentilla taas tarkoitetaan kokonaisuutta, jonka osia voi vikaantua, mutta nämä ovat vaihdettavissa tai korjattavissa. (Birolini 2010; O'Connor & Kleyner 2012)

Luotettavuuden (*Reliability*) määritelmä on yksinkertaisimmillaan vikaantuneiden komponenttien suhde koko tarkasteltavaan populaatioon. Esimerkiksi luotettavuuden ollessa  $R = 0,9$  keskimäärin kymmenen komponenttia vikaantuu sadan kappaleen tarkasteluerässä. Jotta tämä numeroarvo olisi kuvaava, tulee samaan yhteyteen liittää vaatimukset toiminnoista, toimintaympäristöistä ja tehtävän kestosta. Lisäksi on tärkeää tietää, voidaanko komponentti laskea uuden veroiseksi, kun tehtävä alkaa. (Birolini 2010)

Luotettavuus-mittari soveltuu vaihdettavissa oleville komponenteille korjattavia komponentteja paremmin. Luotettavuus sallii komponentin vaihdettavissa olevien osien päivittämisen ja näin ollen sitä voidaan teoriassa soveltaa myös korjattaville komponenteille. Tähän liittyy kuitenkin oletus, että komponentti on täysin uuden veroinen korjauksen jälkeen. Käytännössä tilanne on harvoin näin, sillä ainoastaan sen vaihdetut osat ovat uudenveroisia. Korjattaville komponenteille sopivampi mittari onkin käytettävyys, joka määritellään komponentin vikaantumisaajan ja huoltoajan avulla. (Birolini 2010)

Vikataajuus (*Failure rate*),  $\lambda$ , kertoo vikaantumistodennäköisyyden tiettyä aikayksikköä kohden. Vikaantumisfunktio (*Probability density function, pdf*) tai vikatiheys,  $f(x)$ , kertoo vikaantumisen todennäköisyyden tietyllä ajan hetkellä. Kumulatiivinen vikaantumisfunktio (*Cumulative distribution function, cdf*),  $F(x)$ , puolestaan kertoo, millä todennäköisyydellä vikaantuminen tapahtuu tietyllä aikavälillä. Vaihtoehtoisesti  $F(x)$  antaa myös vikaantuneiden määrän suhteessa koko populaatioon tietyllä aikavälillä. Kuvassa 7 on havainnollistettu vikaantumisfunktion ja kumulatiivisen vikaantumisfunktion suhdetta toisiinsa aikavälillä  $a \leq x \leq b$ .



**Kuva 7.** Kumulatiivinen vikaantumisfunktio (ylhäällä) kertoo todennäköisyyden, että vikaantuminen tapahtuu tiettyyn ajan hetkeen mennessä, kun taas vikaantumisfunktio (alhaalla) kertoo hetkellisen vikaantumisen todennäköisyyden. (Cristaldi et al. 2011)

Todennäköisyys, että vikaantuminen tapahtuu ajan hetkeen  $b$  mennessä, saadaan vastavasti laskemalla kertymäfunktio aikavälille  $0 \leq x \leq b$ . Luotettavuus saadaan kumulatiivisen vikaantumisfunktion avulla seuraavan kaavan mukaisesti:

$$R(x) = 1 - F(x) = 1 - \int_0^x f(x)dx. \quad (1)$$

Vikaantumisfunktion muoto on riippuvainen käytetystä jakaumasta. Näitä ovat muun muassa normaali-, lognormaali-, eksponentti- ja Weibull -jakauma. Eri jakaumia käytetään sovelluskohteesta ja testistä riippuen. Esimerkiksi Weibull -jakauma soveltuu edellä mainituista parhaiten eliniän määrittämiseen, kun taas eksponenttijakauma antaa vastaavassa tilanteessa liian suuren käyttöiän.

Luotettavuutta voidaan lisäksi kuvata joko keskimääräisen vikaantumisajan MTTF (*Mean time to failure*) tai keskimääräisen vikaantumisvälin MTBF (*Mean time between failure*) avulla. MTTF kuvaa vikaantumisten välistä keskimääräistä toiminnallista aikaa. Tätä käytetään tyypillisesti vaihdettavien komponenttien tapauksessa. MTBF kuvaa vikaantumisten välistä kalenteriaikaa, johon kuuluu MTTF:n lisäksi huoltoon kuluva aika MTTR (*Mean time to repair*). Tätä käytetään tyypillisesti korjattavissa olevien kappaleiden tapauksessa. (Birolini 2010; Cristaldi et al. 2011; O'Connor & Kleyner 2012)

Käytettävyys (*Availability*) voidaan määritellä monella tavalla. Hetkellinen käytettävyys (*Point availability*) kertoo todennäköisyyden sille, että komponentti tai systeemi on käytettävissä tietyllä ajan hetkellä. Sitä kuvataan tyypillisesti kirjainparilla PA ja se saadaan MTTF:n ja MTTR:n avulla seuraavasti:

$$PA = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}. \quad (2)$$

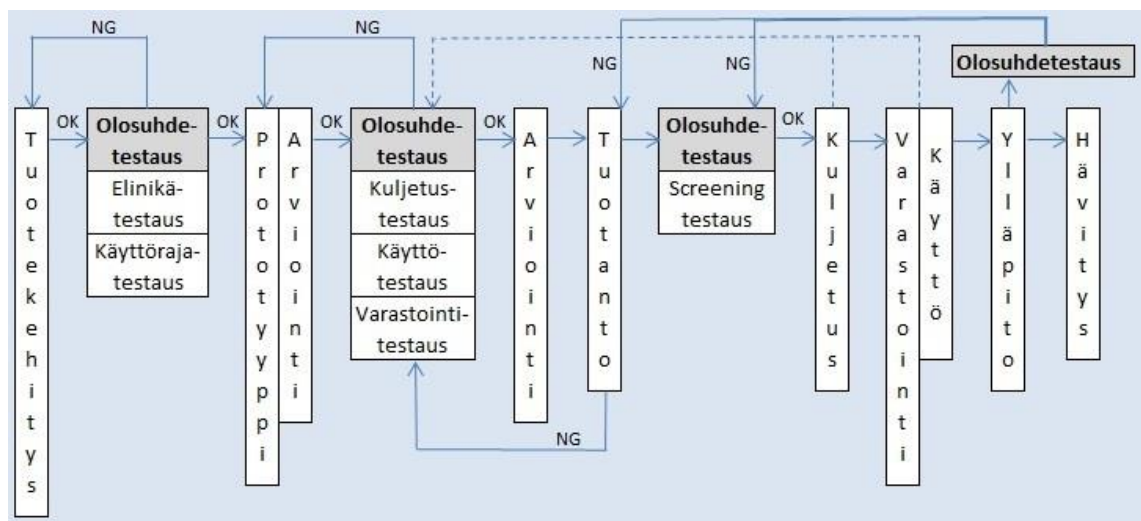
MTTF on riippuvainen tuotteen luotettavuudesta, kun taas MTTR on riippuvainen tuotteen huollettavuudesta. Kuten edellä todettiin, käytettävyys on kuvaava luotettavuuden mittari korjattavissa oleville komponenteille. Vikaantumisen sattuessa tuote saadaan takaisin käyttöön korjauksen avulla. Tällöin tuotteen luotettavuus ei muutu, mutta korjausajalla on kuitenkin vaikutus tuotteen käytettävyyteen. (Ajit et al. 2010; Birolini 2010) Ajit et al. (2010) mukaan vaihdettavan komponentin käytettävyys on sama kuin sen luotettavuus.

Käytännön luotettavuustarkasteluissa voi olla tarpeellista jakaa komponentteja vielä muihinkin kategorioihin vaihdettavuuden ja korjattavuuden lisäksi. Jako turvallisuuteen ja käytettävyyteen vaikuttaviin komponentteihin voi esimerkiksi olla tarpeellinen, kun arvioidaan komponentin vaurioitumisen kriittisyyttä.

## 4.2 Testaus

Tällä hetkellä nosturien ja nostinten testaus tehdään tyypillisesti aina jollain tavalla kiihdytettynä, esimerkiksi jatkuvana ajona, maksimikuormaa, maksiminostosyklejä tai näiden erilaisia yhdistelmiä käyttäen. Tavallisesti testit ovat joko nosto- tai siirtotestejä. Myös yksittäisiä komponentteja, kuten köysiä, ketjuja, vaihteita, koukkuja, jarruja ja erilaisia sähkökomponentteja, testataan.

Luotettavuustestausta tarvitaan, sillä tuote on harvoin täydellinen. On myös mahdotonta analysoida ja olla tietoinen kaikista mahdollisista vikaantumisen syistä ilman testausta. Tämä korostuu erityisesti silloin, kun komponentin tai laitteen rakennetta on muutettu tai se on kokonaan uusi. Tuotteen ympäristöolosuhteiden kestoa testataan tyypillisesti erilaisilla olosuhdetesteillä. Testausta voidaan tehdä tuotteen elinkaaren eri vaiheissa sen eri tasoille. Eri vaiheilla tarkoitetaan esimerkiksi tuotekehitys- tai tuotantovaihetta. Tätä on havainnollistettu kuvassa 8. Eri tasoilla tarkoitetaan puolestaan esimerkiksi komponentti-, systeemi- tai ohjelmistotasoa. Lisäksi testaus voidaan jakaa kahteen kategoriaan sen perusteella, halutaanko laitteen vikaantuvan testissä vai ei.



**Kuva 8.** Olosuhdetestaus tuotteen elinkaarella: OK viittaa tilanteeseen, jossa siirrytään hyväksytysti seuraavaan vaiheeseen, kun taas NG viittaa tilanteeseen, jossa joudutaan palaamaan johonkin edeltävään vaiheeseen. (Espec Technology Report No1 1996)

Luotettavuustestauksen voidaan todeta kuuluvan vikaantumishakuisuuden suhteen molempiin testauskategorioihin. O'Connor & Kleyner (2012) mukaan se kuitenkin pääosin kuuluu testaukseen, jossa tarkoituksen mukaisesti tuotetaan vaurioita. Perusideana on, että tuotteen luotettavuutta ei voida kehittää edelleen, ellei tunneta riittävän hyvin sen vikaantumiseen johtavia syitä. Luotettavuustestauksessa tarkkaillaan päävikamuotojen suhdetta joko aikaan, sykleihin tai matkaan tilanteesta riippuen. Sen avulla pyritään löytämään mahdolliset heikkoudet jo tuotteen elinkaaren alkuvaiheessa, jolloin taloudellisesti kannattavien korjausten tekeminen on mahdollista ennen tuotteen päätymistä asiakkaalle. (Birolini 2010)

Testiympäristön tulisi kattaa ympäristöolosuhteet, joille laite todennäköisesti altistuu elinikänsä aikana. Yleisimmät luotettavuuteen vaikuttavat ympäristörasitukset ovat lämpötila, kosteus, värinä, mekaaninen shokki, pöly, kemikaalit ja erilaiset sähköiset rasitukset. Sähkölaitteiden kohdalla tulee ottaa huomioon sähkömagneettisten kenttien vaikutukset ja jännitepiikit. UV -säteily luo omat haasteensa muovi- ja kumikomponenteille. Lisäksi voiteluaineen vanheneminen, teollisuuden saasteet tai suolasumu lisäävät ympäristön rasittavuutta. Esimerkiksi MIL-STD-810G (2008) ja ISO/IEC 60068 tarjoavat testimenetelmät edellä kuvatuille rasitustekijöille.

Testattava laite voi olla testin aikana levossa tai käytössä. Näistä jälkimmäinen antaa todellisempia tuloksia, sillä laitteen toiminta tuottaa myös rasituksia, kuten lämpöä. Tällöin ympäristön lämpötilan sekä laitteen itse tuottaman lämpötilan summa on se, jolla on merkitystä. Testien pituus riippuu testin rasittavuudesta ja komponentin kestävyyydestä. (O'Connor & Kleyner 2012)

Jos laitetta käytetään tavallisesti vain osan aikaa sen odotetusta eliniästä, voidaan testiin luoda kiihdytetty vaikutus lisäämällä jännitysten taajuutta yli laitteen tyypillisen käyttöasteen. Jos taas laite on käytössä suuren osan eliniästään tai koko ajan, ei käyttöasteen lisäyksellä välttämättä saavuteta haluttua kiihdytystä. Tällöin kiihdytys tehdään nostamalla laitteeseen kohdistuvia jännityksiä. Käytettävään kiihdytystapaan ja jännitysten suuruuteen vaikuttaa myös testin tavoite: onko tarkoituksena selvittää laitteen elinikä vai sille ominaiset vikamekanismit. (O'Connor & Kleyner 2012)

Kiihdytetyssä testissä vikamekanismit pyritään aktivoimaan selektiivisesti niin, että vikaantuminen vastaa kentällä tapahtuvaa vikaantumista. Testin onnistuminen edellyttää oikeiden rasitusten kiihdytystä. Tyypillisesti tämä toteutetaan kiihdyttämällä rasituksia, joille laite altistuu myös kentällä. Lisäksi tekniikan tuntemisesta ja kokemuksesta vastaavien tuotteiden vikaantumisesta on apua. Vääränlainen testin kiihdytys johtaa sekundääristen vikamekanismien esille tuloon, jolloin tilanne ei enää vastaa käytäntöä. Jännityksiä voidaan kiihdyttää joko laitteen teknisten rajojen sisä- tai ulkopuolella. Näistä edellä mainittua kutsutaan elinikätestaukseksi kun taas jälkimmäinen keskittyy vikamekanismien etsimiseen sekä vikamuotojen esille tuomiseen. Kun jännityksiä korotetaan yli laitteen maksimirajojen, testin perusteella ei voida enää määrittää elinikää. (Birolini 2010; O'Connor & Kleyner 2012)

Kiihdytetty elinikätestaus (*Accelerated life testing, ALT*) edustaa monille luotettavuustestauksen perinteistä näkökulmaa, joka ei tähtää vikaantumiseen. Puhutaan myös määrällisestä kiihdytetystä testistä (*Quantitative accelerated test*). Testaus suoritetaan simuloitujen olosuhteiden avulla ja tavoitteena on, että vikaantumisten määrä on alle testille määritellyn kriteerin. Testin kiihdytys tehdään joko lisäämällä käyttöastetta tai kasvattamalla rasitusten suuruutta. Rasitusten tulee olla kuitenkin alle laitteelle määritettyjen teknisten maksimiarvojen, jotta eliniän määrittäminen olisi mahdollista.

ALT:ssa näytekoon tulee olla mahdollisimman suuri. (Nelson 2004) Nosturien tapauksessa suuri näyte koko on usein mahdoton toteuttaa. Tällöin näytekoon tulee olla suurin mahdollinen. Testin vaatimuksissa määritellään tavoiteltavat parametrit. Testin jälkeen tarkastellaan, kuinka moni laitteista on saavuttanut tavoitteet, onko jokin laitteista ylittänyt tai alittanut ne ja jos on niin, kuinka paljon. Tämän perusteella voidaan antaa todennäköisyys sille, että laite saavuttaa odotetun eliniän. Näyte koko taas vaikuttaa siihen, millä varmuudella testin luotettavuuden voidaan todeta olevan tietyllä tasolla. Testin avulla voidaan myös määrittää elinikä, jolloin laitteet pyritään mahdollisuuksien mukaan testaamaan vikaantumiseen asti. (Nelson 2004; O'Connor & Kleyner 2012)

Kiihdytyskerroin,  $A$  (*Acceleration factor*), kuvaa testissä käytetyn jännityksen suhdetta todellisissa käyttöolosuhteissa vallitsevaan jännitykseen. (Cristaldi et al. 2011) Se voidaan määrittää erillisten testien avulla. Birolinin (2010) mukaan elinikätestauksessa yleisesti oletetaan, että oikeanlainen testin kiihdytys ei muuta kumulatiivisen vikaantumisfunktion muotoa, vaan ainoastaan sen parametrit muuttuvat. Tällöin eliniän määrittäminen tulee mahdolliseksi, kun tunnetaan testille ominainen kiihdytyskerroin.

Nelson (2004) antaa esimerkin, jossa dieselmoottoria ajetaan 102 % mittausteholla, jolloin kiihdytyskerroimen oletetaan olevan kolme. Karkeasti tämä tarkoittaa sitä, että jos testissä moottori kestää 400 tuntia, voidaan sen olettaa kestävän  $3 * 400 = 1\,200$  tuntia kentällä. Joissain tilanteissa kiihdytyskerroimen voidaan olettaa olevan yksi, jolloin erillisiä testejä sen määrittämiseen ei tarvita. Esimerkiksi kontaktorin elinikä voi olla määriteltävyä päälle-pois -kytkentöjen määränä. Todellisuudessa kytkentöjä tulee harvakseltaan, mutta elinikätestauksen yhteydessä testi saadaan kiihdytettyä tekemällä kytkennät nopeassa tahdissa. Tällöin elinikää vastaavat kytkennät saadaan täyteen huomattavasti lyhyemmässä ajassa kuin kentällä ja kiihdytyskerroimen voidaan olettaa olevan yksi. Tämä luonnollisesti sisältää oletuksen, että testauksessa käytetty suurempi päälle-pois -kytkentäaajuus ei merkittävästi muuta muita testausolosuhteita, kuten lämpötilaa.

Toisinaan testille ominaisen kiihtyvyyserroimen selvittäminen ei ole helppoa ja vääränlaisat johtopäätökset kiihtyvyyserroimen suuruudesta voivat johtaa virheellisiin arvioihin laitteen eliniästä. Nelson (2004) kritisoi kiihdytyskerroimen käyttöä, sillä se sisältää useita matemaattisia oletuksia, jotka pätevät todennäköisesti vain marginaalisesti käytännössä. Lisäksi sen käytössä tehdään monia muita yksinkertaistuksia. Hänen mukaansa useissa yrityksissä kiihdytyskerrointa saatetaan pitää tunnettuna kertoimena, mikä paradoksaalisesti käytännössä tarkoittaa sitä, että sen todellista alkuperää ei tunneta. Se on kenties arvioitu testituloksista tai edeltävän tuotteen kenttätiedoista. Se ei ota huomioon kertoimen epävarmuutta, joka muodostuu tilastollisten näytteiden testi- ja kenttätiedon satunnaisuudesta. Lisäksi on epätodennäköistä, että rakenteeltaan erilaisten laitteiden kiihdytyskerroin olisi sama. Nelson (2004) kritisoi myös oletusta, jonka mukaan vikaantumisfunktion muotoparametrit kiihdytetyssä testissä ja todellisuudessa olisivat samat. Kiihdytyskerroimen määrittäminen tekee edelleen monimutkaisemmaksi useat samaan aikaan vaikuttavat vikamekanismit. Vikamekanismeja on useimmiten enemmän kuin yksi.

Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kaikille eri vikamekanismeille tulisi määrittää erillinen kiihdytyskerroin. (Nelson 2004) Edellä kuvatut asiat on hyvä ottaa huomioon, kun pohditaan elinikätestauksen tulosten luotettavuutta. Lisäksi tulee muistaa, että kiihdytyskertoimen laskeminen väärällä tavalla kiihdytetystä testistä tuottaa virheellisiä johtopäätöksiä.

Testausta, jossa vikamekanismit pakotetaan esiin, kutsutaan ylikiihdytetyksi testaukseksi (*Highly accelerated life testing, HALT*). Lisäksi käytetään termiä laadullinen kiihdytetty testaus (*Qualitative accelerated test*). Testauksen avulla ei pyritä simuloimaan käyttöympäristön olosuhteita, vaan tavoitteena on tuoda esille vikasyyt ja niiden seuraukset niin lyhyessä ajassa kuin mahdollista. Vikaantuminen voi tapahtua HALT:ssa useita kerta-luokkia nopeammin kuin kentällä. Tämä on seurausta yli sallitun rasitustason olevista jännityksistä. Kiihdytettäviä jännityksiä voi olla monia eikä niiden määrälle tai suuruudelle ole asetettu rajoja. Ainoa rajoittava tekijä on vaatimus, että jännitysten tulee kiihdyttää realistisia vikamekanismeja. Testissä käytetään tyypillisesti useita samanaikaisia jännityksiä, joiden jännitysprofiilit voivat olla hyvinkin monimutkaisia. O'Connor & Kleyner (2012) esittelevät muutamia ALT:sta poikkeavia mahdollisia testin rasitustason kiihdytysmenetelmiä mekaanisille, sähkömekaanisille ja sähköisille komponenteille taulukossa 3.

**Taulukko 3.** Erilaisia tapoja luoda monipuolinen kiihdytetty vaikutus HALT:ssa mekaanisille, sähkömekaanisille ja sähköisille komponenteille. (O'Connor & Kleyner 2012)

KOMPONENTTI	<b>Mekaaniset:</b> köysi/ketju, voimansiirto, vaihdelaatikko jne.	<b>Sähkömekaaniset:</b> moottori, jarru jne.	<b>Sähköiset:</b> kontaktorit, mekaaniset kytkimet jne.
ESIMERKKEJÄ KIIHDYTYSTAVASTA	1. Aloita testi vanhoilla voiteluaineilla tai muilla nesteillä (esim. jäähdytysneste). 2. Aja vähillä nesteillä. 3. Käytä nesteitä, jotka ovat lämmitettyjä, viilenettyjä tai sisältävät epäpuhtauksia. 4. Käytä vanhoja suodattimia. 5. Suuntaa akselit, laakerit tai muut vastaavat komponentit väärin. 6. Käytä epätasapainossa olevia pyöriviä komponentteja.	1. Altista korkeille tai matalille lämpötiloille, värinälle, kosteudelle tai muulle vastaavalle. 2. Käytä komponentteja, joiden dimensiot ovat toleranssien ulkopuolella. 3. Suuntaa akselit, laakerit tai muut vastaavat komponentit väärin. 4. Käytä materiaaleja tai komponentteja, joiden ominaisuudet (tiheys, paino, kitkakerroin jne.) eivät ole teknisissä tiedoissa määriteltujen rajojen sisällä.	1. Altista korkeille tai matalille lämpötiloille, värinälle, kosteudelle tai muulle vastaavalle. 2. Altista lämpösyklaukselle. 3. Altista korkeataajuiselle värinälle.

Useista rasitustekijöistä ja näiden kumulatiivisista vaikutuksista johtuen kiihdytys ei tapahdu selkeän mallin mukaan eikä näin ollen testille voida määrittää kiihdytyskerrointa.

HALT soveltuukin vikaantumiskäyttäytymisen selvittämiseen eikä sitä missään tapauksissa tulisi käyttää eliniän tai muiden luotettavuuden määrällisten mittarien (esimerkiksi MTBF, MTTF) määrittämiseen. (O'Connor & Kleyner 2012) HALT suoritetaan usein siihen erityisesti suunnitelluissa kammioissa. Kammioissa on usein mahdollista yhdistää laajat lämpötila-alueet ja lämpötilan vaihtelut sekä korkeat satunnaiset värähtelyt. HALT:ia voidaan soveltaa mille tahansa tuotteelle, mutta erityisen yleistä se on sähkökomponenttien testauksessa.

Edellä todettiin, ettei ALT ole testausmuotona vikaantumisorientoitunut. Muita vikaantumishakuisuuden suhteen samaan kategoriaan kuuluvia testausmenetelmiä ovat muun muassa demonstraatiotestit sekä screening ja burn-in -testit. Demonstraatiotestejä hyödynnetään tuotantovaiheessa valmiille tuotteille. Niiden avulla varmistetaan, että laite täyttää sille asetetut vaatimukset erilaisten kriteerien suhteen. Testiajat voivat perustua standardeihin, kuten esimerkiksi ISO 4301-1 (1986) standardin mukaisiin nosturin käyttöluokituksiin. Demonstraatiotestejä käytetään lähinnä perusteluna asiakkaalle laitteen kestävydestä eikä testauksen tavoitteena ole löytää laitteelle tyypillisiä vikamekanismeja. (Ajit et al. 2010; Nelson 2004)

Screening -testien (*Stress screening* tai *Environmental stress screening - ESS*) tavoitteena on tuoda esille kylpyammekäyrän alkuvaiheen vikaantumiset. Screening ja burn-in testejä voidaan tehdä jo tuotekehitysvaiheessa, mutta tyypillisesti niitä käytetään tuotantoketjun loppuvaiheessa. Testauksen avulla estetään viallisten laitteiden päätyminen loppukäyttäjälle. Laite altistetaan etukäteen määritetyille testausolosuhteille (jännitykset ja aika), jotka simuloivat pahinta mahdollista tilannetta. Testin tarkoituksena on saada vikaantumaan ne vialliset laitteet, jotka läpäisisivät muut testit. Vaikka rasitustaso on korkea, lyhyen testausajan ansiosta laitteiden eliniät eivät lyhene merkittävästi eikä laitteisiin aiheudu muita muutoksia testauksen aikana. (Nelson 2004)

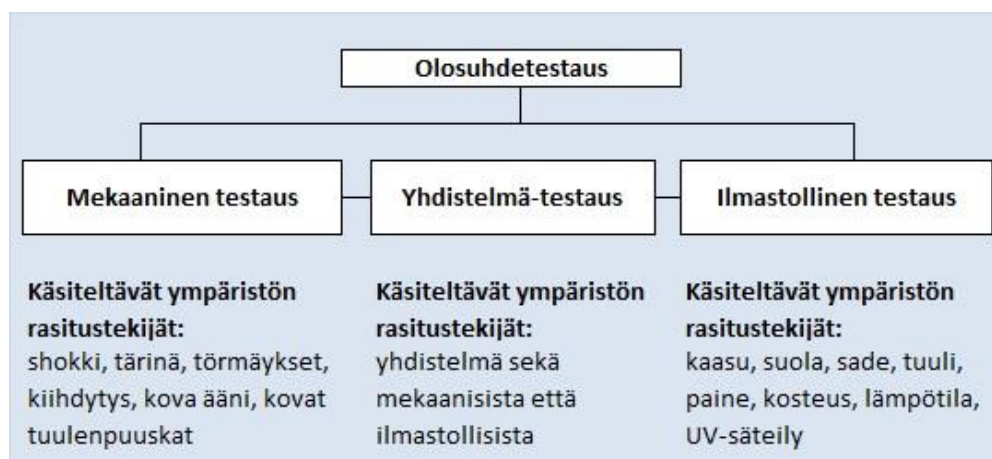
O'Connor & Kleyner (2012) mukaan screening -testauksen suorittaminen on usein kallista, sillä testiotos kattaa tavallisesti koko tuotantoerän. Laitteen lasketaan läpäisseen testi, jos testin aikana ei tapahdu vikaantumista. Vikaantumiset tulisi kuitenkin analysoida tarkasti testauksen jälkeen, jotta voidaan olla varmoja testin tehokkuudesta. Vikaantuneiden laitteiden pieni määrä voi esimerkiksi tarkoittaa kahta eri asiaa: joko testausmenetelmä on tehoton viallisten laitteiden havaitsemiseen tai laite on jo valmiiksi hyvin luotettava. Jälkimmäinen näistä vastaa luonnollisesti tavoiteltavaa tilannetta.

Screening -testaus voidaan tehdä esimerkiksi käyttäen korkeaa lämpötilaa (*burn-in*), lämpösyklausta tai tasaista kiihtyvyyttä. Ideaalisen screening -menetelmän löytäminen edellyttää alkuvaiheen vikaantumisen tarkkaa analysointia. Erityisen tärkeää on selvittää, minkälaiset rasitukset todennäköisimmin aiheuttavat vikaantumista. (Espec Technology Report No. 1 1996; O'Connor & Kleyner 2012) Screening -testauksen käytännöt on määritelty tarkasti kansainvälisissä standardeissa. Testejä suositetaan erityisesti elektroniikka-

komponenteille ja -osakokoonpanoille, mutta sitä voidaan soveltaa myös muille komponenteille. Testausmenettelyjä sähkölaitteille on käsitelty tarkemmin muun muassa standardeissa IEC 61163 (2006) ja MIL-HDBK-2164A (1996). Testaus voidaan tehdä tarpeen mukaan myös kiihdytettynä. Tällöin puhutaan HASS -testauksesta (*Highly accelerated stress screening*). (O'Connor & Kleyner 2012)

HASS eroaa edellä kuvatuista kiihdytetyistä testeistä testin tavoitteen perusteella. Kun HALT:ssa tavoitteena on saada laitteet vikaantumaan, on HASS:n tavoite saada ainoastaan heikot ja vaurioituneet laitteet vikaantumaan. Kiihdytys on siis huomattavasti maltillisempaa HALT:iin verrattuna. (O'Connor & Kleyner 2012) Birolini (2010) muistuttaa lisäksi, että screening -tyyppisellä testauksella ei etsitä systemaattisia vikoja, vaan se keskittyy satunnaisvikamekanismien aktivointiin. Systemaattisella vialla tarkoitetaan vikaa, joka on suora seuraus alkutilanteesta ja jonka poistaminen vaatii muutoksia rakenteeseen, valmistusprosessiin, laitteen käsittelyyn tai muuhun vastaavaan. HALT testaus puolestaan keskittyy juuri systemaattisten vikojen löytämiseen.

Vikaantumishakuisuuden lisäksi olosuhdetestaus voidaan jakaa myös testattavan rasituksen mukaan. Espec Technology report No. 1 (1996) tekee olosuhdetestaukselle karkean jaon kolmeen kuvan 9 mukaisesti. Olosuhdetestaus kattaa mekaanisen ja ilmastollisen testauksen sekä näiden yhdistelmät. Tyypillisesti oikein suunniteltu yhdistelmätestaus simuloi parhaiten komponenttiin tai laitteeseen kohdistuvia rasituksia sen käyttöympäristössä.



**Kuva 9.** Olosuhdetestauksen jako mekaaniseen, ilmastolliseen sekä näiden yhdistelmien testaukseen. (Espec Technology report No. 1, 1996)

Esimerkiksi elektroniikkakomponenttien yhdistelmätestaus on hyvin yleistä. Elektroniikkakomponenttien ja -kokoonpanojen yhdistelmätestauksessa (*Combined environmental reliability testing, CERT*) käytetään tyypillisesti siihen erityisesti valmistettuja ohjelmoitavia kammioita. Kammioissa on useimmiten mahdollisuus lämpösyklaukseen ja värinän keston testaukseen. Erikoiskammiossa voi olla muitakin testausmahdollisuuksia, kuten kosteuden tai matalapaineen suhteen. Kammiossa on sähköiset liittimet, jotka mahdollistavat sähköisten signaalien syötön ja laitteen tilan tarkkailun ulkoisten laitteiden avulla.



Edellä kuvattujen lisäksi luotettavuutta voidaan lisätä myös erilaisten laadunvalvontatietien avulla. Yritys voi tehdä näitä omassa tuotannossaan valmistetuille komponenteille tai vastaavasti alihankituille komponenteille. Laadunvalvontatestejä suoritetaan muun muassa oston yhteydessä. Erityisesti laadunvarmistustestaus voi olla tarpeellista uuden toimittajan kohdalla. Vanhalle toimittajalle voidaan puolestaan tehdä laadunvalvontatestaus pistokoeluoontoisesti. Testaus voidaan suorittaa itse tai vaihtoehtoisesti myös toimittajan oma testaus voidaan katsoa tilanteesta riippuen riittäväksi. (O'Connor & Kleyner 2012)

Tarjolla olevien olosuhdetestausstandardien kirjo on laaja. Suurin työ onkin löytää näiden joukosta kullekin komponentille tai laitteelle olennaiset testausmenetelmät. Tämä vaatii hyvää taustatutkimusta ennen testaussuunnitelman laatimista. Olosuhdetestausstandardeja löytyy erityisen kattavasti elektroniikkakomponenteille. Esimerkiksi MIL -standardit (*United States Military Standards*), IEC -standardit (*International Electrotechnical Commission*), ISO -standardit (*International Organization for Standardization*) ja JEDEC -standardit (*Joint Electron Device Engineering Council*) tarjoavat kattavan listauksen erilaisista olosuhdetesteistä. MIL, JEDEC ja EN -olosuhdetestausstandardit on listattu myös liitteisiin 1 - 3. Suurin osa MIL ja JEDEC -standardeista on vapaasti saatavilla Internetissä. Vaikka pääosin olosuhdetestausstandardit on tehty elektroniikkakomponenttien testausta silmällä pitäen, voidaan näitä tarvittaessa soveltaa muidenkin komponenttien tai laitteiden testaukseen. (Espec Technology report No. 1 1996)

MIL-HDBK-781A (1996) esittelee luotettavuustestausmenetelmät ja testiympäristöt tuotekehitystä, teknisten rajojen määrittystä ja tuotantoa varten. MIL-STD -781D (1986) määrittelee luotettavuustestauksen tuotekehitystä, teknisten rajojen määrittystä ja tuotantoa varten. MIL-STD-202 (2002) -standardisarja tarjoaa yleiset testausstandardit elektroniikka- ja sähkökomponenttien testaukseen ja MIL-STD-810G (2008) -standardisarja puolestaan määrittelee olosuhdetestausmenetelmät eri ympäristön rasisutustekijöille. Jälkimmäinen kattaa ilmastollisista rasisutustekijöistä matalapaineen sekä altistumisen korkealle ja matalalle lämpötilalle, lämpöshokille, sateelle (alijäähtynyt sade sekä tuulen lisävaikutus mahdollista huomioida), kosteudelle, homeelle, korroosiolle, hiekalle ja pölylle. Dynaamisista rasisutustekijöistä standardi sisältää kiihtyvyyden, shokin, kuljetuksesta aiheutuvan shokin ja satunnaisen tärinän. Yhdessä nämä antavat ohjeet käyttöolosuhteiden määrittelyyn ja olosuhdetestauksen suunniteluun. MIL -standardit on alun perin kehitelty Yhdysvaltojen armeijan omaan käyttöön, mutta Espec Technology Report No. 1 (1996) mukaan niitä sovelletaan nykyään laajasti eri tekniikan aloilla ympäri maailmaa.

IEC 60721 (1990) -standardisarja määrittelee ympäristöolosuhdeluokituksen ja IEC 60068 puolestaan ympäristöolosuhdetestauksen kansainväliset standardit. Ympäristöolosuhdeluokitus kattaa maapallolla esiintyvät ympäristöolosuhteet ja niiden aiheuttamat rasisutukset. Olosuhdetestausstandardeissa määritellään rasisutustestit eri rasisutusolosuhteiden mukaan sekä parametrit, joita hyödynnetään esimerkiksi tuotteen käyttöympäristön rasisutustekijöiden maksimien ja minimien määrittelyssä. IEC on määritellyt elektroniikkakomponenttien kiihdytetyn testauksen standardissa IEC 62506 (2013). Standardissa on

useita eri testausmenetelmiä eri ilmasto- ja dynaamisille rasitusolosuhteille. Rasitusolosuhteet kattavat lämpötilan, kosteuden, mekaaniset rasitukset, sähköiset rasitukset ja staattisen sähköön purkaukset. Standardia voidaan käyttää niin eliniän määrittämiseen, potentiaalisten vikamekanismien tunnistamiseen, käyttövarmuuden selvittämiseen kuin riittävän luotettavuuden varmentamiseenkin. Se on lisäksi sovellettavissa sekä korjattaville että vaihdettaville komponenteille.

Vaikka MIL-STD-810G (2008) ja ISO/IEC 60068 tarjoavat testimenetelmät eri rasitustekijöille, O'Connor & Kleyner (2012) mukaan nämä eivät kuitenkaan ole täysin ideaalisia luotettavuustestauksen kannalta. Edellä mainituissa testimenetelmissä on tavoitteena todentaa, että tuote ei vaurioidu tai vikaannu testin aikana. Suurin osa testeistä ei myöskään vaadi, että laite olisi käytössä testauksen aikana, joten testit eivät vastaa todellista käyttöä. Lisäksi testit eivät kata yhdistelmätestausta vaan ne keskittyvät ainoastaan yksittäisen ympäristöolosuhteen testaukseen. Yleisesti ottaen standardit ovat hyvä lähtökohta testaukselle. Toisinaan voi kuitenkin olla järkevämpää räätälöidä komponentin tai laitteen ominaisuuksien ja rasitustekijöiden perusteella sille täysin oma testimenetelmä. Tämä vaatii luonnollisesti hyvää tuntemusta niin taustatekijöistä kuin testauksesta yleensä. (Espec Technology report No. 1 1996)

#### 4.2.1 Lämpötestit

Espec Technology Report No. 1 (1996) mukaan lämpötila on yksi merkittävimmistä elektroniikkakomponenttien ja -laitteiden vaurioon johtavista ympäristöllisistä rasitustekijöistä. Samaisessa raportissa annetaan karkea nyrkkisääntö lämpötilan rasittavuudesta, joka auttaa hahmottamaan lämpötilan vaikutusta elinikään. Nyrkkisäännön mukaan 10 °C nousu käyttölämpötilassa johtaa eliniän puolittumiseen. 20 °C nousu puolestaan pudottaa eliniän neljäsosaan. O'Connor & Kleyner (2012) muistuttavat, että lämpötilalla on elektroniikkakomponenttien eliniän lisäksi suuri merkitys mekaanisten komponenttien korroosionopeuteen.

Lämpötilan nosto onkin usein käytetty tapa kiihdyttää elinikätestiä. Korkeaa lämpötilaa hyödynnetään usein myös screening -testauksessa (burn-in). Arrheniuksen yhtälöä käytetään laajasti havainnollistamaan lämpötilan vaikutusta prosessin nopeuteen. Tässä tapauksessa prosessin nopeus vastaa vikaantumiseen kuluvaa aikaa eli laitteen tai komponentin elinikää. Arrhenius yhtälön mukaan

$$R(T) = K e^{-\frac{E_A}{kT}}, \quad (3)$$

missä  $R$  on prosessin nopeus,  $T$  lämpötila kelvineinä ilmoitettuna,  $K$  sovelluksesta riippuvainen vakio,  $E_A$  vikamekanismin aktivaatioenergia ja  $k$  Boltzmannin vakio ( $8,6159 \times 10^{-5} \text{ eV/}^\circ\text{K}$ ). Aktivaatioenergian suuruuteen vaikuttavat materiaali, vikamekanismi tai molemmat näistä. Kiihdytyskerroin saadaan kaavan (3) avulla seuraavasti

$$AF = \frac{R(T)_1}{R(T)_2} = e^{\frac{E_A}{k}(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2})}, \quad (4)$$

missä  $AF$  on kiihdytyskerroin,  $R(T)_1$  käyttöä vastaava prosessin nopeus,  $R(T)_2$  kiihdytettyä testiä vastaava prosessin nopeus,  $T_1$  käyttölämpötila ja  $T_2$  kiihdytetyn testin lämpötila. (Espec Technology Report No. 1 1996)

O'Connor (2001) toteaa, että lämpötilan testauksessa olennaisimpia asioita ovat lämpötilan ääriarvot ja lämpötilan muutosnopeus. Ennen testin aloitusta tulee olla tietoinen tarvittavista sulamis- ja jäätympisteistä, kondensoitumislämpötiloista sekä mahdollisten nesteiden viskositeeteistä. Monet lämpötilan aiheuttamista vaikutuksista ovat deterministisiä eli niillä ei ole kumulatiivisia vaikutuksia. Näiden kohdalla aika tai syklien määrä eivät suoraan vaikuta luotettavuuteen. Esimerkiksi sulamispiste ei muutu, vaikka materiaali altistuisi useille lämpösykleille. Lämpötilalla on kuitenkin myös kumulatiivisia vaikutuksia. Esimerkiksi muutokset voiteluaineen viskositeetissa voivat aiheuttaa kulumista tai erot lämpölaajenemiskertoimissa väsymistä. (O'Connor & Kleyner 2012)

Lämpötilatestaus voidaan tehdä korkean tai matalan lämpötilan testinä. Testi voi olla luonteeltaan pito-, syklaus- tai shokkitesti. Pitotestissä lämpötila pidetään vakiona koko testin ajan. Ne ovat tavallisesti hyvin pitkäaikaisia, sillä vikaantuminen vakio lämpötilassa tapahtuu materiaalin heikkenemisen kautta. Lämpösyklit ja -shokit puolestaan aiheuttavat mekaanista rasitusta, jolloin vikaantuminen voi tapahtua huomattavasti lyhyemmässä ajassa. Lämpösyklaus- ja shokkitestien lämpötilarajat ja pitoajat tietyissä lämpötiloissa voivat olla samat. Testien eroavaisuus muodostuu lämpötilan muutosnopeudesta. Lämpösyklaustestissä muutosnopeus on muutaman celsiusasteen suuruusluokkaa minuutissa. Lämpöshokkitestauksessa se voi puolestaan olla kymmeniä asteita minuutissa. (JESD22-A103D 2010; JESD22-A104D 2009; JESD22-A106B 2004) Lisäksi lämpötilan ja kosteuden yhteisvaikutuksia voidaan testata erilaisin yhdistelmätestein, joita on kuvattu tarkemmin kohdassa 4.2.2 *Kosteustestit*.

Lämpötilatestauksessa tulee lisäksi huomioida läsnä olevien kiinteiden aineiden ja kaasujen lämpökapasiteetit. Lämpökapasiteetti on materiaalin fyysinen kyky varastoida lämpöä ja se on kiinteillä aineilla suurempi kuin kaasuilla. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että testattavan kappaleen lämpötila ei muutu samassa suhteessa kuin testikammion sisällä oleva ilma. (Callister 2007) Todellinen pitoaika voi jäädä hyvin lyhyeksi eikä testi vastaa suunniteltua tilannetta, jos lämpökapasiteettia ei oteta huomioon.

JEDEC on määritellyt useita testausstandardeja elektroniikkakomponenttien olosuhdetestaukseen lämpötilan keston näkökulmasta. Esimerkiksi JESD22-A103D (2010) määrittelee elektroniikan pitotestauksen, jossa lämpötila on yli laitteen normaalin käyttölämpötilan vaihdellen tyypillisesti välillä +85...+300 °C. JESD22-A104D (2009) puolestaan

määrittelee lämpötilarajat elektroniikan lämpösyklaustestaukselle. Lämpötilarajat määräytyvät testattavan komponentin ja materiaalin mukaan, mutta tavallisesti ne vaihtelevat välillä  $-55...+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Lämpösyklus voidaan suorittaa myös niin, että komponentin läpi johdetaan jaksoittain virtaa tai vastaavasti tehdään päälle-pois -kytkentöjä. Tällöin puhutaan tehosyklauksesta. JEDEC on määritellyt tehosyklauksen standardissa JESD22-A105C (2004) ja lämpöshokkitestauksen puolestaan standardissa JESD22-A106B (2004). Lämpötestaus voidaan tehdä myös kiihdytettynä elinikätestauksena. Standardi MIL-STD-750F (2012) määrittelee lämpötestausmenetelmät burn-in, korkean lämpötilan elinikä- ja lämpöshokkitestaukselle.

#### 4.2.2 Kosteustestit

Kuten lämpötila myös kosteus voi kiihdyttää tai aiheuttaa vikaantumista. Vikaantumisen kiihtyminen voi tapahtua esimerkiksi korroosion, veden imeytymisen tai homeen kasvun kautta. Kosteuden määrä on kääntäen verrannollinen lämpötilaan, kunnes kastepiste on saavutettu, jonka jälkeen vesi alkaa kondensoitua pinnoille. Kosteus vaikuttaa metallikomponentteihin korroosionopeuden sekä muovikomponentteihin veden imeytymisen kautta. (O'Connor & Kleyner 2012) Elektroniikka komponenteille kosteus on ongelmallinen, sillä niissä on usein sekä ruostuvia metallisia osia että vettä imeviä muoviosia. Lisäksi kosteus voi aiheuttaa sähkökomponenteissa ionien vaellusta sekä tiivistäiden homehtumista.

Espec Technology Report No. 2:ssa (1996) todetaan, että kosteus kuuluu tärkeimpiin ilmastollisiin tekijöihin, jotka aiheuttavat vikaantumista. Raportissa on käsitelty tarkemmin puolijohdelaitteiden ja piirikorttien vikaantumista sekä testausta. Raportissa käsitellyt asiat kattavat hyvin lähes minkä tahansa sähkölaitteen testauksen, sillä juuri näitä komponentteja löytyy tänä päivänä joka laitteesta.

Kosteustesteissä komponentti altistetaan tyypillisesti korkealle ilmankosteudelle. Tavallisesti kosteustestille on määritelty myös tarkka lämpötila. Oikeastaan kosteustestit ovat aina lämpötilan ja kosteuden yhdistelmätestausta. Komponenttiin tai laitteeseen voidaan lisäksi kytkeä esijännite testin ajaksi. Tyypillisesti kosteustestit ovat pitotestejä. Lämpötilaa ja ilmankosteutta voidaan kuitenkin tarvittaessa muuttaa sykleissä. Komponentin tai laitteen kestoa kondensoivissa olosuhteissa voidaan testata valitsemalla kondensoitumiselle otolliset lämpötila- ja ilmankosteusarvot, jolloin kondensoituminen on jatkuvaa. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää syklistä testiä, jolloin kondensoituminen käynnistyy aina siirryttäessä viileämmästä lämpötilasta lämpimämpään. Jälkimmäisessä lämpötilan muutosnopeuden tulee olla riittävän suuri, jotta näytteen ja sitä ympäröivän ilman välille syntyy kondensoitumiselle otollinen lämpötilaero.

Yleisimmin luotettavuustestauksessa käytetty menetelmä on 85/85 -testi. Siinä testattava komponentti tai laite altistetaan  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$  asteen lämpötilalle sekä 85 % suhteelliselle ilmankosteudelle laitteen ollessa jännitteinen (*Temperature-Humidity Bias Test, THB*). Testi

on määritelty esimerkiksi puolijohdelaitteille standardeissa IEC 749 ja JESD22-A101C (2009). Tilanteesta riippuen voidaan hyödyntää muitakin lämpötilan ja ilmankosteuden suhteita, esimerkiksi 60 °C asteen lämpötilaa ja 90 % ilmankosteutta. (Espec Technology Report No.2 1996)

Luotettavuuden lisääntyessä myös 85/85 -testin testausajat ovat pidentyneet. Tästä johtuen on kehitelty menetelmiä kosteustestauksen kiihdyttämiseen edelleen. Kiihdytettyjä testejä tehdään painekammiossa, jolloin normaalia suurempi paine mahdollistaa veden nopeamman tunkeutumisen materiaaliin. Espec Technology Report No.2 (1996) esittelee kaksi eri kiihdytettyä menetelmää: painekammiotesti eli PCT (*Pressure cooker test*) ja HAST (*Highly accelerated stress test*). Testit eroavat suhteellisen ilmankosteuden perusteella, sillä PCT:ssä se on saturoitunut 100 %, kun taas HAST:ssä se on saturoitumaton eli alle 100 %. HAST:ista käytetään englanniksi myös termiä USPCT (*Unsaturated pressure cooker test*), jossa ilmankosteuden saturoimattomuus tulee selvemmin esille jo itse termissä.

### 4.2.3 Korroosiotestit

Korroosiota esiintyy niin mekaanisissa kuin sähköisissä komponenteissa, sillä molemmissa on tyypillisesti metallisia komponentteja. Korrosio on erityisen ongelmallinen ferriittisille metalleille niiden altistuessa kostealle käyttöympäristölle. Ei-ferriittisistä metalleista, jotka myös kärsivät korroosion vaikutuksista, voidaan mainita alumiini, kupari ja magnesium. Näistä erityisesti alumiinille on tyypillistä muodostaa oksidoituessaan hyvin kova ja suojaava oksidikerros. Alumiinin vikaantuminen korroosion vaikutuksesta vaatii pitkän ajan tai erityisen korrodoivan ympäristön. Ferriittisillä metalleilla ei ole tällaista ominaisuutta, mistä johtuen korroosiolla on kumulatiivinen vaikutus vikaantumiseen. (O'Connor 2001) Lämpötila vaikuttaa vallitseviin kosteusolosuhteisiin ja siksi sillä on niin suuri merkitys korroosion kannalta. Lisäksi lämpötila vaikuttaa Arrheniuksen yhtälön mukaisesti kemiallisia reaktioita kiihdyttävästi. (VTT 2007)

Tyypillisesti komponenttien tai laitteiden korroosionkestoa testataan suolasumutestein. Kuten edellä esitetyt testausmenetelmät, myös suolasumutestaus voidaan tehdä jatkuvana tai syklisenä testinä. Testin kesto riippuu testattavasta komponentista tai laitteesta vaihdellen muutamasta tunnista useisiin päiviin tai viikkoihin. Korroosiotestaus tehdään tavallisesti korroosiokaapissa, joka mahdollistaa tietyn lämpötilan, suhteellisen ilmankosteuden, suolasumutuksen ja kuivauksen. Suolasumun vahvuus vaihtelee testistä riippuen.

Suolasumutestaukseen liittyviä standardeja tarjoavat ASTM, IEC, SFS, MIL ja JEDEC. Eri järjestöt tekevät paljon yhteistyötä standardien laatimisessa ja osa standardeista ovat vastaavia toistensa kanssa. Standardi ASTM B117 (1973) määrittelee vaatimukset testilaitteistoille, -menetelmille ja -näytteille. Standardissa määritellyn kontrolloidun testimenetelmän avulla on mahdollista saada tietoa pinnoittamattoman tai pinnoitetun metallinäytteen korroosionkestosta. Standardi käsittelee testausta yleisellä tasolla eikä näin ollen

määrittele testinäytteiden tyyppiä tai tarkkoja altistusaikoja. Testin jälkeen näyte pestään, jotta vaurioiden vakavuus saadaan selvästi näkyviin suolajäämien alta. Komponentista riippuen tarkastellaan massahäviöiden, irronneen pinnoitteen tai korroosiotuotteiden määrää.

Jatkuvassa korroosiotestissä näyte altistetaan jatkuvalla suolasumulle. Lämpötila pidetään koko testin ajan vakiona. Usein käytetyssä meri-ilmastoa simuloivassa testissä näyte altistetaan vesiliuokselle, jossa on 5 % natriumkloridia. Testauslämpötila on tyypillisesti 35 °C astetta. Tällainen testausmenetelmä on määritelty muun muassa standardeissa ASTM G85-11 (2011), IEC 60068-2-11 (1981) ja SFS-EN 60068-2-11. Näistä ensimmäisen todetaan soveltuvan sekä teräksille ja kevytmetalleille että orgaanisille ja epäorgaanisille pinnoitteille. Kaksi jälkimmäistä soveltuvat puolestaan korroosiosuojapinnoitteiden laadun ja yhtenäisyyden arvioimiseen.

MIL-STD 810G 509.5 (2008) standardi esittelee suolasumutestausmenetelmän, jota voidaan soveltaa screening -testaukseen, potentiaalisten ongelma-alueiden paikantamiseen, suunnitteluvirheiden etsimiseen ja niin edelleen. Se soveltuu niin suojapinnoitteiden ja viimeistelymateriaalien testaukseen kuin fysikaalisten ja sähköisten ominaisuuksien muutosten tarkkailuun. JESD22-A107C (2013) standardit on kehitelty hermeettisesti tiivistettyjen tai valettujen elektroniikkakomponenttien testaukseen. Sen laatimisessa on käytetty hyödyksi kahta MIL -standardia: MIL-STD-750-1 (2012), joka määrittelee olosuhdetestausmenetelmät puolijohdekomponenteille; sekä MIL-STD-883H (2010), joka määrittelee testausmenetelmät mikropiireille. Standardi SFS-EN ISO 9227 (2012) puolestaan keskittyy metallien, metalliseosten ja näiden pinnoitteiden korroosion keston.

Syklinen testi koostuu toistuvista sykleistä, jotka yksinkertaisimmillaan muodostuvat suolasumun ja kuivien jaksojen vaihtelusta. Syklinen suolasumutestaus voidaan suorittaa niin kutsuttuna proheesiotestinä, jolloin kappaletta vuorotellen sumutetaan suolasumulla tunti ja kuivataan tunti. Syklisiä suolasumutestejä on määritelty standardeissa IEC 60068-2-52 (1996), SFS-EN 60068-2-52, SFS-EN ISO 16701 (2008) ja ASTM G85-11 (2011).

Korroosiotestit ovat tyypillisesti kiihdytettyjä testejä, joissa näyte altistetaan todellisia käyttöolosuhteita rankemmille olosuhteille. Testiä voidaan kiihdyttää lisäksi luomalla jonkinlainen alkusysäys vikaantumiselle, esimerkiksi tekemällä komponentin korroosiosuojapinnoitteeseen naarmu ennen testausta. Testin aikana tarkkaillaan, miten naarmu vaikuttaa komponentin korroosionkeston ja pinnoitteen pysyvyyteen. (Espec Technology Report No10 2000) Useammassa edellä kuvatussa standardissa todetaan, että korroosiotestaus soveltuu parhaiten ongelmakohtien, kuten pinnoitteen epäjatkuvuuskohtien tai suunnitteluvirheiden, etsimiseen. Vastaavasti sitä voidaan käyttää myös eri pinnoitteiden tai muiden ominaisuuksien vertailuun. Elinikätestaukseen ne eivät sovellu, sillä testin olosuhteet eivät tavallisesti vastaa käyttöolosuhteita.

#### 4.2.4 Dynaaminen olosuhdetestaus

Dynaamisessa olosuhdetestauksessa tarkastellaan laitteen tai komponentin luotettavuutta sen mekaanisen kestävyysnäkökulmasta. Mekaaniseen kestävyysvaikututtavat materiaalin lujuus-, jäykkyys-, kovuus- ja iskusitkeysominaisuudet. Dynaamisella testauksella voidaan selvittää näytteen kestoja erilaisten rasitusten alaisuudessa. Lisäksi voidaan selvittää sen väsymis- ja kulumiskestävyys sekä elinikää. Mekaaninen rasitus voi johtua niin fyysisestä kuormasta kuin erilaisten ilmasto-olosuhteiden vaihteluista. Ilmastollisia mekaanisia rasituksia aiheuttavat muun muassa tuuli, ilmanpaine tai kosteuden jäätyminen ja eripariliitosten erot lämpölaajenemiskertoimissa.

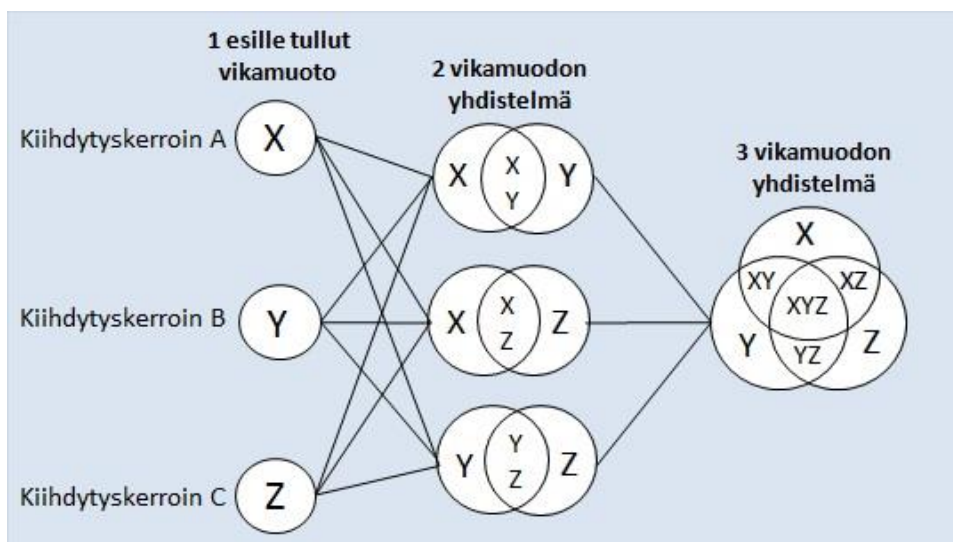
Mekaanisen testauksen kategoriaan kuuluu siis hyvin laaja kirjo erilaisia testausmenetelmiä. Tässä työssä käsitellään mekaanista testausta dynaamisen olosuhdetestauksen näkökulmasta. Dynaamisella viitataan aktiiviseen prosessiin ja rajausta painottuu niihin komponenttiin tai laitteeseen vaikuttaviin rasituksiin, jotka ovat ympäristön tai itse komponentin ja laitteen aiheuttamia rasituksia. Ympäristön aiheuttamia rasituksia ovat esimerkiksi kuljetuksesta aiheutuvat värinä ja iskut, kun taas sisäisiä rasituksia ovat esimerkiksi laitteen käytöstä johtuva kiihtyvyys, shokit tai värinä. Rajauksen ulkopuolelle jäävät ne mekaanisen testauksen osa-alueet, jotka voidaan paremmin laskea materiaalitutkimukseksi tai laadunvarmistustestaukseksi. Tällaisia ovat esimerkiksi vetokokeet ja kovuuskokeet.

Dynaaminen olosuhdetestaus mekaanisilla komponenteilla käsittää pääasiassa erilaiset elinikä-, iskusitkeys-, väsymis- ja kulumistestit. Sähkökomponenttien dynaamisessa olosuhdetestauksessa testataan tyypillisesti komponentin kykyä sietää kiihtyvyyttä, iskuja ja värinää. Tämän lisäksi voidaan testata niiden kykyä sietää ulkoisia sähköisiä jännityksiä, kuten ESD:n aiheuttamia jännitepiikkejä tai eri komponenttien sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta riippuvia tekijöitä. Sähköisen laitteen tai komponentin vikaantumista seurataan testin aikana ulkoisten anturien avulla.

MIL-STD810G määrittelee erilaiset ympäristöolosuhteet, jotka tehtaalla valmistettu laite tai komponentti kohtaa kuljetuksen yhteydessä. Standardissa on määritelty kiihtyvyyden, shokin, kuljetuksesta aiheutuvan shokin ja satunnaisen värinän testaus. Kuljetuksesta aiheutuvat rasitukset on jaettu värinöihin ja shokkeihin eri kuljetustapojen mukaan maantien-, rautatie-, lentokone- ja laivakuljetuksessa. IEC määrittelee puolestaan sähkökomponenttien kiihdytetyn testauksen standardissa IEC 62506 (2013). Standardi kattaa dynaamisista rasituksista juuri värinä-, isku- ja jyskytystestauksen. JEDEC tarjoaa puolestaan omat standardinsa dynaamiseen testaukseen: JESD22-B103B (2002) värinälle sekä JESD22-B110B (2013) mekaaniselle shokille. Sähköisten rasitusten testaus on määritelty standardeissa JS-001-2012 (2012), JESD22-A115C (2010) ja JESD22-A122 (2007). Näissä määritellään testausmenetelmät ihmisen ja koneen aiheuttamille ESD -purkauksille erikseen sekä tehosyklaukselle.

#### 4.2.5 Yhdistelmätestaus

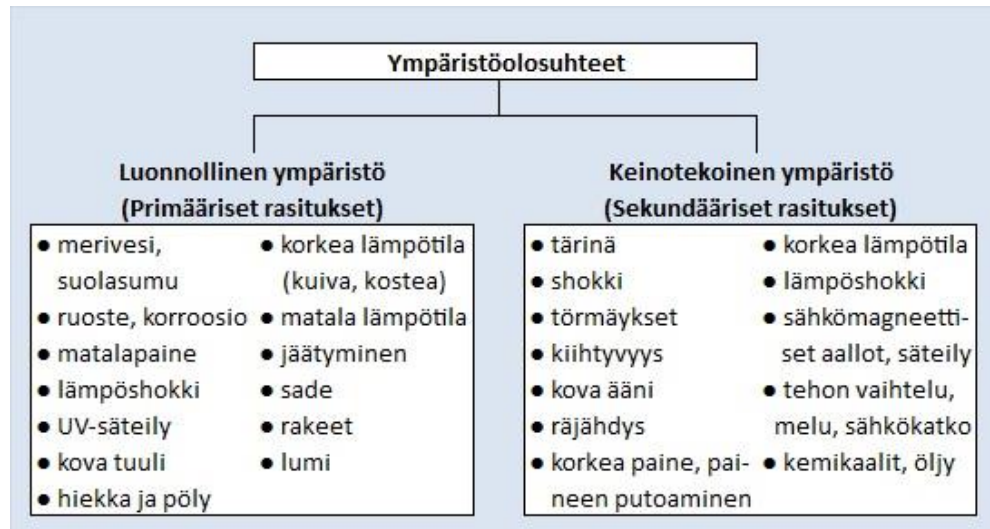
Todellisessa käyttöympäristössä vaikuttaa harvoin vain yksi rasitustekijä kerrallaan. Olosuhdetestauksessa yhdistelmätestaus on yleistä, sillä se säästää aikaa ja antaa lisäksi käytännön läheisempiä tuloksia. Yhdistelmätestauksen lyhenne CERT tulee englanninkielen sanoista *Combined environmental reliability test*. Yhdistelmätestauksessa yhdistetään kaksi tai useampi rasitustekijä. Olosuhdetestauksen perustuessa yksittäisen rasitustekijän testaamiseen, saadaan testin kompleksisuutta lisäämällä korotettua testille ominainen kiihdytyskerroin kolmin- tai viisinkertaiseksi. Kun yhdistelmätestauksessa korotetaan näin jokaista yksittäistä rasitustekijää, saadaan koko testin kiihdytyskerroin kymmen- tai satakertaiseksi. Rasitustekijöiden yhdistäminen ei pelkästään nopeuta testiä vaan voi tuoda esille myös aivan uusia vikamekanismeja. (Espec Technology Report No. 4 1997) Tätä on havainnollistettu kuvassa 10.



**Kuva 10.** Yhdistelmätestauksen tulosten laajuus (Espec Technology Report No. 4 1997)

Yhdistelmätestausta käytetään usein simuloimaan kuljetuksen tai käytön aikaista vikaantumista. Tyypillisiä yhdistelmätestausmuotoja on yhdistää lämpötilan ja kosteuden, lämpötilan ja matalapaineen, lämpötilan ja värinän sekä lämpötilan, kosteuden ja värinän vaikutukset. Espec Technology Report No. 3 (1997) mukaan yhdistelmätestauksen rasitusolosuhteet voidaan jakaa primäärisiin ja sekundäärisiin. Tämä jako on esitetty kuvassa 11. Primäärisiin rasituksiin kuuluvat luonnon aiheuttamat rasitukset, jotka ovat riippuvaisia muun muassa vuoden ajasta, korkeudesta meren pinnasta sekä maantieteellisestä sijainnista. Sekundääriset rasitukset ovat puolestaan keinotekoisia rasituksia, jotka ovat seurausta kuljetus- ja käyttöolosuhteista. Kuvasta 11 nähdään, että keinotekoisissa ympäristössä mekaaniset rasitukset ovat dominoivia.

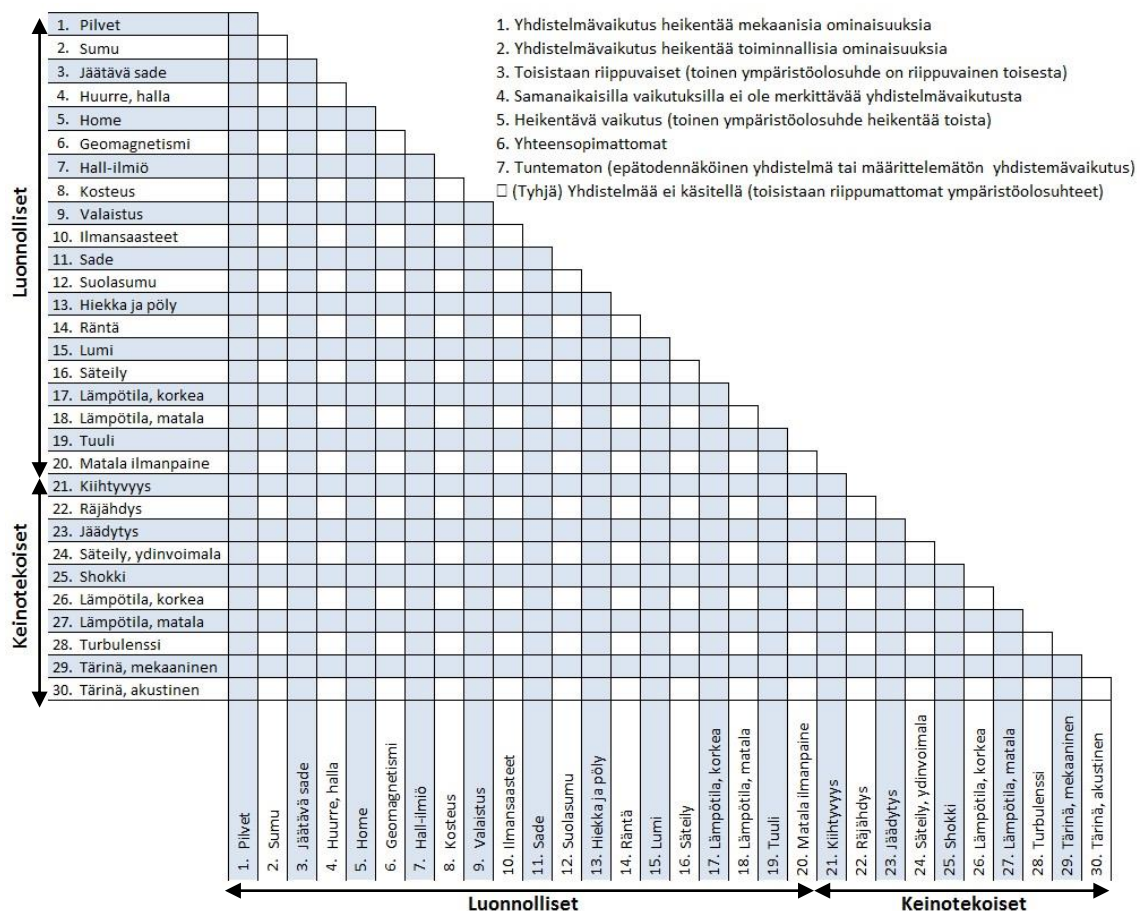




**Kuva 11.** Yhdistelmätestauksen rasitukset luonnollisessa ja keinotekoisessa ympäristössä (Espec Technology Report No. 3 1997)

Taulukossa 4 on esitetty NASA:n PD-EC-1101 ohjeistuksessa esitetty ympäristöolosuhtematriisi, jota voidaan hyödyntää olennaisten ympäristöolosuhteiden tunnistamiseen.

**Taulukko 4.** Ympäristöolosuhtematriisi olennaisten olosuhdetekijöiden tunnistamiseen (PD-EC-1101 2014)

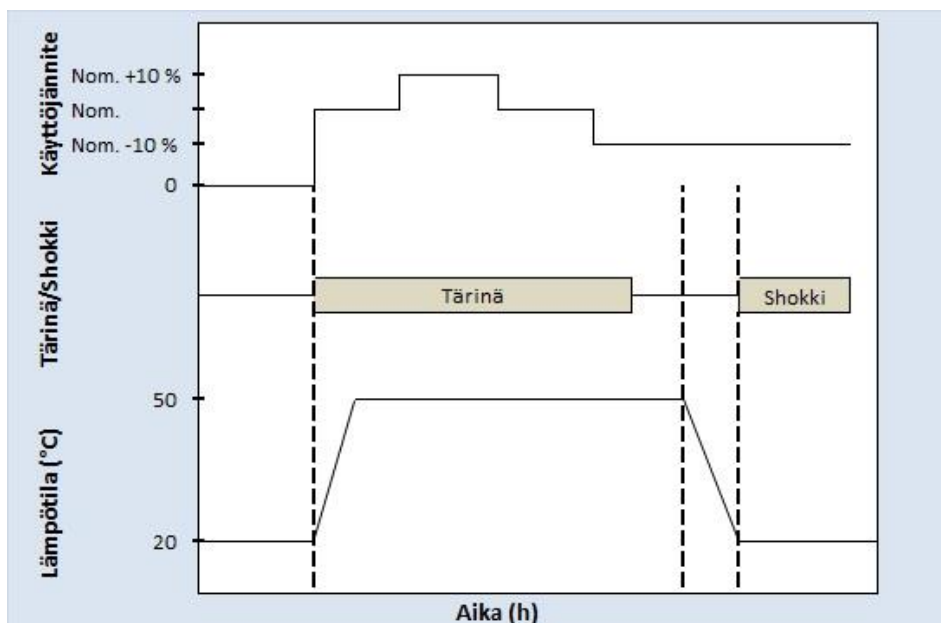


Matriisissa olosuhdetekijät on jaettu luonnollisiin ja keinotekoiisiin tekijöihin. Alkuperäisessä taulukossa on lisäksi avaruudessa vaikuttavat olosuhdetekijät, mutta ne on jätetty

pois tässä työssä esitetystä matriisista. Matriisissa olosuhdetekijöiden vaikutusta toisiinsa kuvataan sitä vastaavalla numerolla (1-7) tai tyhjällä ruudulla, jos yhdistelmää ei syystä tai toisesta käsitellä. (PD-EC-1101 2014)

Yhdistelmätestausta tehdään tyypillisesti siihen erityisesti suunnitelluissa CERT -kaapeissa tai -kammioissa. Yhdistelmätestauksen avulla voidaan simuloida todellisen käyttöympäristön olosuhteita paremmin kuin testattaessa ainoastaan yhtä rasitustekijää kerrallaan. Testejä toteutetaan laajasti eri sähkökomponenteille, mutta niitä voidaan yhtä hyvin soveltaa muillekin komponenteille. O'Connor (2001) toteaa, että yhdistelmätestauksen olosuhteet sisältävät normaalisti käyttöjännityksen (tavallisesti sähköinen jännitys) sekä jotain seuraavista tai mahdollisesti ne kaikki: lämpösyklus, värinäsyklus ja kosteuden syklaus.

Harvoin on silti mahdollista yhdistää aivan kaikkia todellisen käyttöympäristön rasitustekijöitä. Onnistuneen yhdistelmätestaussuunnitelman laatiminen vaatii hyvää tuntemusta niin käytetyistä materiaaleista ja tekniikoista kuin käyttöympäristön rasitustekijöistä. Näiden avulla kokenut testin laatija kykenee poimimaan vikaantumisen kannalta olennaiset tekijät ja luomaan testaussuunnitelman, joka tuo esille jo ennustetut ja mahdolliset muut vikamekanismit. (Espec Technology Report No10 2000) Tyypillinen auto- ja ilmailuteollisuudessa käytetty yhdistelmätestauksen jännitysprofiilit on esitetty kuvassa 12.

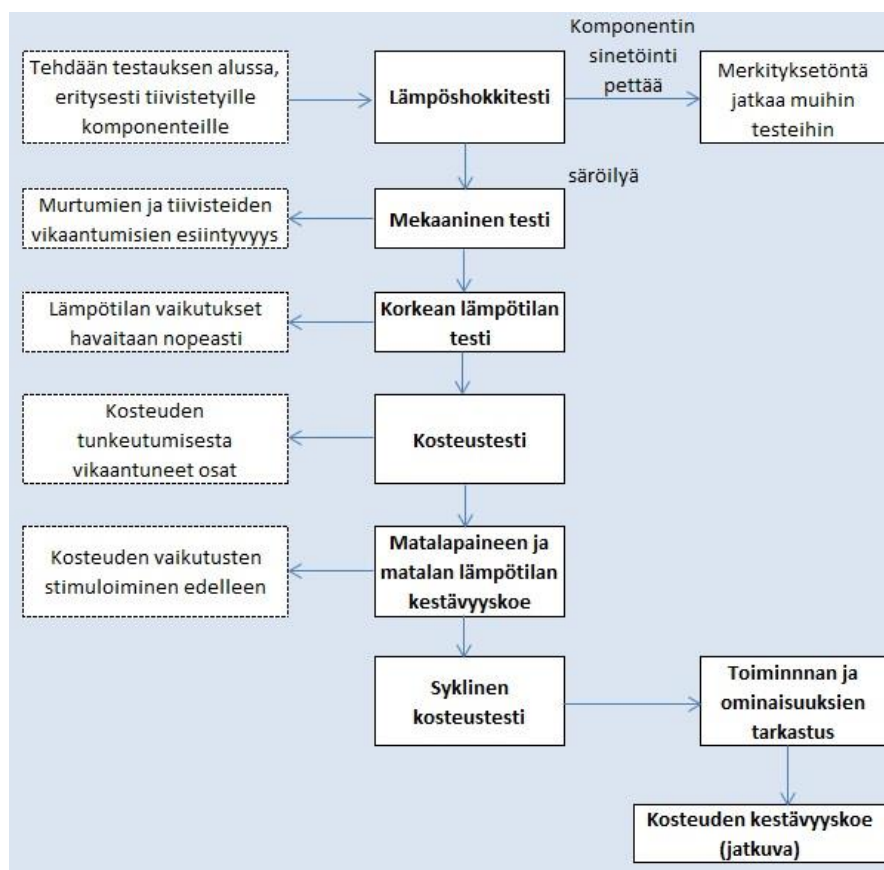


**Kuva 12.** CERT-testauksessa tyypillinen jännitysprofiili auto- ja ilmailuteollisuudessa käytettäville sähkökomponenteille (O'Connor 2001)

Espec Technology Report No10 (2000) toteaa, että yhdistelmätestaus voidaan suorittaa myös sarjana erillisiä ympäristörasituskokeita. Testisarja laaditaan niin, että sen rasitusolosuhteet noudattelevat laitteen tai komponentin todellisia rasitusolosuhteita. Testisarjan ympäristötesteissä edetään vähiten rasittavista testeistä pysyviä vahinkoja aiheuttaviin

testeihin. Jos testattavia näytteitä on enemmän kuin yksi, on tärkeää, että kaikkien näytteiden testisarja on järjestykseltään sama. Näin näytteiden vertailtavuus säilyy. Menetelmää käytetään erityisesti silloin, kun testinäytteiden määrä on vähäinen, mutta niiden avulla halutaan saada mahdollisimman paljon tietoa laitteen tai komponentin vikaantumisesta sen eri käyttöolosuhteissa.

Kuvassa 13 on esitetty testisarja. Se on laadittu sähkökomponenttien ja -laitteiden testausta varten. Testisarjan runkoon vaikuttaa testin rasittavuuden lisäksi eri rasitustekijöiden yhteisvaikutukset. Testien järjestys on pyritty valitsemaan niin, että rasitusolosuhteet vahvistavat toisiaan mahdollisimman optimaalisella tavalla. Tämä testisarja ei ole standardoitu, vaan se toimii lähinnä mallina, jota voidaan varioida komponentista tai laitteesta riippuen. Erityisesti laitteiden kohdalla varioinnin tarpeellisuus on todennäköistä. Testisarjan ensimmäisenä vaiheena on lämpöshokkitesti, josta se etenee mekaaniseen testiin sekä erilaisiin lämpö- ja kosteustesteihin.



Kuva 13. Esimerkki komponenttien ympäristötestisarjasta (Espec Technology Report No10 2000)

Pääosin kaikki sähkökomponentit ovat umpinaisia tai koteloituja. Jos toiminnallisen komponentin kotelointimateriaali ei kestä täysin lämpöshokkitestin korkeaa tai matalaa lämpötilaa, testisarjaa on merkityksetöntä jatkaa muihin testeihin. Muissa tapauksissa lämpöshokkitestissä syntyneitä säröjä ja tiivistevaurioita voidaan lähteä kasvattamaan edelleen mekaanisen testin (esimerkiksi tärinä- tai shokkitesti) avulla. Raportissa todetaan,

että tätä seuraavien lämpö- ja kosteustestien aikana vauriot aiheuttavat usein vaihtelevuutta komponentin tai laitteen toiminnallisuudessa, joka helpottaa vikaantumisen havaittavuutta. Tyypillisesti syklinen kosteustesti tuo viimeistään esille toiminnallisten ominaisuuksien muutoksia. Syklinen kosteustesti mahdollistaa kosteuden merkittävän tunkeutumisen vioittuneisiin osiin niin kutsutun huohotusilmiön (*Breathing effect*) kautta.

Jatkuva kosteustesti soveltuu komponenteille, jotka ovat käyttöympäristössään pitkiä aikoja kosteissa olosuhteissa. Testi vaatii suhteellisen pitkän testausajan ja siitä syystä se onkin hyvä jättää viimeiseksi olosuhdetestiksi. Muut testit (kuten esimerkiksi korroosio-, pudotus- ja UV-säteilyaltistustestit tai sähkökomponenttien erikoistestit: liitoslujuus- ja juotosliitostestit) eivät ole tyypillisesti osana testisarjaa, vaan ne suoritetaan erillisinä testeinä erillisille näytteille. (Espec Technology Report No10 2000)

### 4.3 Analysointimenetelmät

Luotettavuuden analysointimenetelmät tulevat tarpeeseen, kun testaus ei syystä tai toisesta ole mahdollisia. Testaus voi olla liian kallista, viedä liikaa aikaa tai olla jopa mahdotonta. Mahdotonta se voi olla esimerkiksi tilanteissa, joissa valmistetaan suuria konstruktioita yksittäiskappaleina. Näin on juuri prosessinosturien kohdalla, jotka tyypillisesti räätälöidään sovelluskohtaisesti vastaamaan asiakkaan prosessin tarpeita. Toisaalta analysointimenetelmiä voidaan hyödyntää myös testauksen pohjatietona.

Aivan kuten testauksessa, myös luotettavuuden analysoinnissa voidaan menetelmästä riippuen saada sekä laadullista että määrällistä tietoa luotettavuudesta. Luotettavuuden analysoinnista puhuttaessa käytetään myös termiä luotettavuuden ennustaminen, jota esiintyy erityisesti määrällisen analysoinnin yhteydessä. Tämä tuo hyvin esille luotettavuuden analysoinnin epävarmuuden. Ennustus ei ole tae sille, että luotettavuusarvot saavutetaan. O'Connor & Kleyner (2012) painottavat, että ennustustulokset ovat paremmin perusta tavoitearvojen laatimiseen. Näihin tavoitearvoihin päästään laitetta tai komponenttia käyttävien ihmisten sitoutumisen kautta. Tulee myös muistaa, että vikaantuminen tai sen puute ovat voimakkaasti riippuvaisia käyttäjästä.

Luotettavuuden analysointi voidaan tehdä erilaisten mallinnus- ja simulointimenetelmien avulla. Näiden hyödyntäminen vaatii tyypillisesti paljon tietoa joko laitteen ominaisuuksista, teknisistä rajoista, fyysisistä dimensioista tai vikaantumishistoriasta. Toisaalta luotettavuutta voidaan kuvata erilaisten vikapuiden ja vuokaavioiden avulla. Lisäksi voidaan hyödyntää asiantuntijoiden arvioita tai aiempaa tietoa samanlaisten tai konstruktioiltaan vastaavien komponenttien tai laitteiden vikaantumisesta. (O'Connor & Kleyner 2012)

Mallinnus- ja simulointimenetelmät perustuvat matemaattisten mallien käyttöön. Ne hyödyntävät fysiikan lakeja ja laskukaavoja ja niiden käyttö vaatii aina teorian tuekseen. Teoria selittää vuorovaikutussuhteet ja siinä käytetyt parametrit. Mallin parametrien tulee olla

selitetty yksiselitteisesti ja sillä tehtyjen ennusteiden olla toistettavissa. Luotettavuusmallit käyttävät hyödykseen luotettavuustietoa, joka voi olla peräisin kentältä tai testeistä. Tyypillisesti tarvittavan tiedon määrä on suuri, jotta sen perusteella on mahdollista tehdä johtopäätöksiä laitteen luotettavuudesta. Menetelmät antavat määrällistä tietoa laitteen tai komponentin luotettavuudesta ja niitä voidaan soveltaa suunnittelu- ja valmistusprosessin eri vaiheissa. (MIL-HDBK-217F 1991) Luotettavuuden ennustukseen on saatavilla useita erilaisia menetelmiä. Luotettavuusalan lehti Reliability HotWire (2006) on listannut luotettavuusennustusmenetelmien tyypillisimmät standardit: MIL-HDBK-217, Bellcore/Telcordia (SR-332), NSWC-98/LE1, China 299B (GJB/z-299B) ja RDF 2000 (IEC 623800). Edellä mainituista NSWC-98/LE1 on kehitelty mekaanisille komponenteille ja muut ovat puolestaan sähkökomponenteille. Esimerkiksi MIL-HDBK-217F (1991) esittelee kaksi luotettavuuden ennustusmenetelmää: *Part stress* ja *Parts count*.

Tietokonepohjainen suunnittelu (*Computer aided engineering, CAE*) mahdollistaa erilaisten rakennevaihtoehtojen nopean havainnollistamisen ja vertailun. (O'Connor & Kleyner 2012) Luotettavuusennustus voidaan tehdä jokaiselle rakennevaihtoehdolle erikseen, jolloin todennäköisesti luotettavuudeltaan parhaimman vaihtoehdon valinta helpottuu. Parhaimman vaihtoehdon valinnan jälkeen samoja menetelmiä voidaan hyödyntää todennäköisten vikaantumiskohtien paikantamiseen ja näiden luotettavuuden parantamiseen edelleen. Esimerkiksi MIL-HDBK-217 (1991) esitetyn *Part stress analysis* -menetelmän avulla voidaan löytää rakenteen ylikuormitetut kohdat.

Luotettavuusennustuksia voidaan hyödyntää myös laitteen tai komponentin ympäristön keston arviointiin. Tällöin arvioidaan rakenteen kykyä ylläpitää vaadittu luotettavuustaso ympäristön ääriolosuhteissa. Rakennemuutosten vaikutusta luotettavuuteen arvioidaan vertailemalla alkuperäisen ja edelleen kehitetyn rakenteen luotettavuusennustuksia keskenään. Ennustusten avulla voidaan lisäksi arvioida raportoitujen vikaantumisten tärkeyttä koko laitteen luotettavuuden kannalta. Esimerkiksi, jos systeemin komponentilla esiintyy paljon vikaantumisia, voidaan vikaantumisten perusteella tehdä luotettavuusennustus komponentin vikataajuudesta. Tämän perusteella voidaan antaa arvio siitä, onko vikaantumisten määrä suhteessa komponenttien kokonaismäärään sallituissa rajoissa vai osoittaako se mahdollisen ongelmakohdan. (MIL-HDBK-217 1991)

Simuloinnin hyödyntäminen ympäristöolosuhteiden mallintamisessa ei ole kuitenkaan niin yksinkertaista kuin pelkästään mekaanisten rasitusten mallintamisessa. Myös O'Connor & Kleyner (2012) tuovat esille haasteet ympäristöolosuhteiden vaikutusten simuloinnista. Todellisten rasitusolosuhteiden huomioon ottaminen on usein hankalampaa kuin yksittäisten kuormien mallintaminen. Esimerkkinä O'Connor & Kleyner (2012) mainitsevat sähkömagneettisten vuorovaikutuksen huomioon ottamisen eri komponenttien välillä sekä rakenteen vääristymisen jännitysten tai lämpötilan muutosten vaikutuksesta. Haastavaa simuloinnille on nimenomaan kaikkien systeemiin vaikuttavien vuorovaikutusten huomioon ottaminen sekä näiden vaihtelevuus. Lisäksi kuormitusten aikavaikutus on usein vaikeasti simuloitavissa.

Standardissa MIL-HDBK-217 (1991) todetaan, että luotettavuuden ennustustyökaluja tulee käyttää järkevästi sen rajoitteet huomioon ottaen. Ennustukset luonnollisesti pyritään tekemään parhaaseen mahdolliseen tietoon perustuen. Ennustus on kuitenkin aina saatavilla olevaan tietoon perustuva piste-ennuste. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että ennustus on pätevä ainoastaan rakenteeltaan ja altistusolosuhteiltaan vastaaville laitteille kuin mistä kerätty tieto on peräisin. Lisäksi ennustusten tekeminen vaatii tyypillisesti tarkat tiedot laitteen rakenteesta, joita voi olla vaikea saada suunnittelun alkuvaiheessa. Toisin sanoen, vaikka simulointi voi joissain tilanteissa säästää aikaa ja rahaa testaamiselta, voi se myös kuluttaa vastaavat resurssit tietojen hankkimiseen. Viimeisenä tulee ottaa huomioon, että ennustus on riippuvainen ennusteen tekijästä. MIL-HDBK-217 (1991) toteaa, että ennustustyökalut ovat hyvä väline, jos niitä käytetään oikein ja tuloksia sovelletaan tunnollisesti luotettavuuden parantamiseen. Jos taas luotettavuusennustus nähdään ainoastaan lukuna, joka tulee saavuttaa, löydetään siihen varmasti keinot ilman, että vaikutetaan systeemiin todellisuudessa mitenkään.

Kun luotettavuuden määrälliseen analysointiin vaadittavien tietojen hankkiminen on haasteellista tai mahdotonta (esimerkiksi yksittäiskappaleiden tai vaihtelevien ympäristöolosuhteiden tapauksessa) voidaan hyödyntää luotettavuustekniikan laadullisia analysointimenetelmiä. Laadullisia analysointimenetelmiä on tarjolla lukuisia. Tässä työssä käsiteltävät analysointimenetelmät on valittu olosuhteenäkökulmaa tukeviksi sekä nostin- ja nosturisovelluksia silmällä pitäen. Luotettavuusanalysoinnin näkökulmasta nostin ja nosturi lasketaan kompleksiksi systeemiksi. Birolini (2010) kuvailee kompleksin systeemin sellaiseksi, jonka rakennetta ei voida esittää yksinkertaisen toimintavarmuuslohkokaavion (*Reliability block diagram*) avulla. Näin on esimerkiksi tilanteessa, jossa systeemin yksittäisellä elementillä on enemmän kuin kaksi mahdollista tilaa (ehjä/vikaantunut) tai enemmän kuin yksi mahdollinen vikamuoto (esimerkiksi oikosulku ja avoin piiri). Lisäksi nosturi ja nostin ovat korjattavissa olevia systeemejä.

Kompleksien systeemien analysoinnissa työkalun tulee yksittäisen vikaantumisen sijaan ottaa systemaattisesti huomioon monimutkaiset vikaantumiset ja prosessit. Kun tarkastelun kohteena on olosuhteiden vaikutukset systeemiin, tulee mallin mahdollistaa sekä sisäisten että ulkoisten vuorovaikutusten huomioimisen. Lisäksi tapahtumien arvottaminen tulee olla mahdollista, jotta voidaan tunnistaa vikaantumisen kannalta kriittiset tekijät.

Laadullisista työkaluista ehkä käytetyin systeemien analysointityökalu on vika- ja vaikutusanalyysi (*Failure mode and effects analysis, FMEA*). Lisäksi vikapuuanalyysijä (*Fault tree analysis, FTA*) ja tapahtumapuuanalyysijä (*Event tree analysis, ETA*) käytetään laajasti. Näissä perusideana on jakaa systeemi pieniin osiin, jonka jälkeen jokaisen erillisen osan vaikutukset luotettavuuteen analysoidaan mahdollisimman tarkasti. Puuanalyysien avulla onnistuu eri osien suhteiden graafinen havainnollistaminen ja sitä kautta luotettavuuden kannalta olennaisten tekijöiden esille tuominen. FMEA:ssa systeemiä tarkastellaan sen eri osien vikamuotojen kautta ja pyritään sen avulla löytämään ratkaisuja rakenteen parantamiseen edelleen. Kokemuspohjaisesta tiedosta on apua sekä vikapuiden että

FMEA:n soveltamisessa, mutta se ei ole välttämätöntä. Menetelmät ovat siis sovellettavissa myös täysin uusille innovaatioille, joiden vikaantumiskäyttäytyminen on tuntematon. FTA ja ETA voidaan kääntää myös määrälliseksi analyysiksi laskemalla jokaisen yksittäisen tapahtuman toteutumiselle oma todennäköisyytensä. Summaamalla tai kertomalla (riippuen vuorovaikutussuhteesta) näitä todennäköisyyksiä saadaan todennäköisyydet myös eri osatapahtumille sekä lopulliselle vikaantumiselle. Taulukko 5 kuvaa eri menetelmien eroja ja yhtäläisyyksiä.

*Taulukko 5. Tyypillisten analysointimenetelmien ominaisuudet (Espec technology report No.10 2000)*

Menetelmä	Lähtökohta	Suunta	Laatu	Raportointi
<i>FMEA</i>	Komponentin vikamuoto	Komponentti → Systemi (alhaalta ylöspäin)	Laadullinen	FMEA – taulukko
<i>FTA</i>	Tuotteen vikaantuminen	Systemi → Komponentti (ylhäältä alaspäin)	Laadullinen/ Määrällinen	FT -diagrammi
<i>ETA</i>	Komponentin vikamuoto	Komponentti → Systemi (alhaalta ylöspäin)	Laadullinen/ Määrällinen	ET -diagrammi

Taulukosta nähdään, että FMEA ja ETA tarkastelevat systeemiä alhaalta ylöspäin eli niissä edetään yksittäisten komponenttien tasolta systeemin tasolle. FTA:ssa lähdetään liikkeelle ei toivotusta tapahtumasta systeemin tasolla, josta puolestaan edetään askelittain yksittäisten komponenttien tasolle. Kaikkien näiden menetelmien onnistumisen ja analyysin kattavuuden kannalta on olennaista tehdä analysointi systemaattisesti sekä suorittaa analysointi mahdollisimman heterogeenisessä ryhmässä. Heterogeenisellä ryhmällä tarkoitetaan tässä kohtaa joukkoa ihmisiä, joilla on erilaiset näkökulmat joko työnkuvansa, koulutuksensa tai muun vastaavan perusteella. Näin analysointi tulee tehtyä mahdollisimman kattavasti joka näkökulmasta. Lisäksi analysoinnin tekemiseen tulee varata riittävästi aikaa.

FMEA-, FTA- ja ETA -analysointimenetelmistä useimmille nosturikomponenteille parhaiten soveltuvia ovat FMEA- ja FTA -menetelmät. ETA ei niinkään mallinna vikaantumista vaan sen avulla voidaan tarkastella komponentin tai laitteen turvallisuustoimintojen tehokkuutta. FTA puolestaan soveltuu ympäristöolosuhteiden kartoittamiseen FMEA:ta paremmin. Analysointimenetelmiä hyödynnetään usein pohjatietona testisuunnitelman laatimiselle, kuten tässä työssä KVL1:lle ja KVL2:lle kappaleessa 5.2 *Elektroniikkakomponentit*. Vikapuuanalyysin avulla saatiin esille tärkeät rasitusolosuhteet, joka mahdollisti testisuunnitelman keskittämisen näihin.

Parhaiten sopivan analysointimenetelmän valintaan vaikuttaa tarkasteltavan laitteen tai komponentin kompleksisuus, rasitusolosuhteet ja analysoinnin tavoitteet. FTA ja FMEA ovat molemmat vikaantumisorientoituneita. Suurin ero niiden välillä muodostuu näkökulmasta lähestyä vikaantumista. FMEA:ssa lähdetään komponenttitasolta kartoittamaan mahdollisia vikamuotoja. FTA:ssa taas lähdetään yksittäisestä vikaantumistapahtumasta



eli huipputapahtumasta, ja pyritään selvittämään kaikki sen takana olevat tekijät. Taulukoon 6 on kerätty tietoa menetelmien soveltuvuudesta erilaisiin tilanteisiin.

**Taulukko 6.** FTA ja FMEA -analysointimenetelmien soveltuvuus erilaisiin tilanteisiin (RIAC 2014)

Tilanne	FTA	FMEA
Päähuolenaiheena on työntekijöiden ja huoltohenkilökunnan turvallisuus	X	
Pieni määrä selkeästi erotettavia huipputapahtumia, jotka voidaan määritellä tarkasti	X	
Huipputapahtumia ei voida määritellä tarkasti tai huipputapahtumia on runsaasti		X
Toiminnallisen profiilin määrittäminen on kriittisen tärkeää	X	
Potentiaalisia toiminnallisia profiileja on useita		X
Päähuolenaiheena on kaikkien mahdollisten vikamuotojen tunnistaminen		X
Suuri mahdollisuus, että vikaantuminen on inhimillisestä virheestä johtuvaa	X	
Suuri mahdollisuus, että vikaantuminen on ohjelmistovirheestä johtuvaa	X	
Kiinnostuksen kohteena on määrällinen riskiarvio	X	
Tuote voidaan laskea kompleksiksi systeemiksi ja/tai se sisältää toiminnallisia polkuja, jotka ovat kiinteästi yhteydessä toisiinsa	X	
Tuotteen toiminnallisuus on pääosin suoraviivaista (vähäinen määrä ihmisen tai ohjelmiston vaikutuksia toimintaan)		X
Tuote ei ole korjattavissa enää käyttöönotton jälkeen (esim. avaruuden sovellukset)	X	

Taulukosta nähdään, että FMEA soveltuu tilanteisiin, joissa systeemi toimii suoraviivaisesti ilman, että ihmisellä tai ohjelmistolla on siihen suurta vaikutusta. Huipputapahtumia ja potentiaalisia toiminnallisia profiileja voi olla useita ja tärkeimpänä kiinnostuksen kohteena on kartoittaa kaikki vikamuodot. FTA soveltuu puolestaan tilanteisiin, joissa huipputapahtumia on rajoitetusta ja niiden tarkka määrittely mahdollista. Lisäksi FTA:ta sovelletaan tyypillisesti tilanteisiin, joissa turvallisuuden varmistaminen ja toiminnallisen profiilin määrittäminen ovat tärkeässä osassa.

#### 4.3.1 Vika- ja vaikutusanalyysi, FMEA

Vika- ja vaikutusanalyysi on systemaattinen työkalu vikamuotojen löytämiseksi. Menetelmän pääideana on käydä läpi systeemin jokaisen komponentin mahdolliset vikamuodot ja arvioida niiden vaikutuksia ja kriittisyyttä systeemin toimintavarmuuteen. Toisinaan, jos kyseessä on hyvin kompleksi systeemi, voi olla mahdotonta käsitellä jokainen sen komponentti erikseen. FMEA:ta voidaan hyödyntää myös kriittisten komponenttien ja systeemien tunnistamiseen. Menetelmällä saadaan tietoa systeemin vikaantumisesta, joka mahdollistaa systeemin luotettavuuden kehittämisen edelleen. FMEA:n systemaatti-



nen luonne takaa, että vikaantuminen tulee käsiteltyä tuotteen jokaisella tasolla. Menetelmän avulla toiminnalliset ongelmat voidaan tunnistaa jo alkuvaiheessa ja niiden kriittisyyttä pienentää. (RIAC 2014)

FMEA on mahdollista suorittaa samalle systeemille monesta eri näkökulmasta. Esimerkiksi turvallisuuden tai käytettävyyden näkökulmista tehdyt FMEA -taulukot voivat poiketa merkittävästi tiettyjen kertoimien kohdalla. (O'Connor & Kleyner 2012 s.186) Myös vian seurauksia voidaan tarkastella eri tasoilla, kuten tiettyjen alasysteemien tai koko systeemin tasolla. FMEA:ta käytetään pääosin vikamuotojen tunnistamiseen ja eri rakennevaihtoehtojen vertailuun. (Biolini 2010) FMEA -analysointimenetelmä on määritelty muun muassa seuraavissa ohjeistuksissa: MIL-STD-1629 Method 102 (Criticality analysis), AIAG-3, ISO/TS 16949, SAE J1739, ARP 5580 sekä P-302-720 (NASA).

Analysointi alkaa komponentin tai osakokoonpanon vikamuotojen kartoittamisella. Kartoitus tehdään mahdollisimman kattavasti, jotta kaikki vaikuttavat tekijät tulee huomioida. Tämän jälkeen arvioidaan vikamuodon aiheuttamia seurauksia ja määritellään niiden vakavuusasteet numeerisesti. Seuraavaksi pohditaan mahdollisia vikaantumiseen johtaneita syitä, niiden ilmenemisen todennäköisyyttä ja jatkotoimenpiteitä syiden poistamiseksi. Lopputuloksena on taulukon 7 mukainen FMEA -taulukko. Yksinkertaisimmillaan taulukossa tulee käsitellä seuraavat asiat (RIAC 2014):

1. Systeemin määrittäminen
2. Systeemin tehtävien listaus
3. Tehtävien toiminnallisten vikaantumisten määrittäminen
4. Vikamuotojen määrittäminen jokaiselle toiminnalliselle vikaantumiselle
5. Vikamuotojen vaikutusten (tuotteeseen) määrittäminen
6. Vikamuodon kriittisyyden arviointi tuotteen toiminnan kannalta (tyypillisesti joko katastrofaalinen, kriittinen, marginaalinen tai vähäinen)
7. Syyn (joka johti vikaantumiseen) määrittäminen
8. Arviointi ja korjaavien toimenpiteiden suositteleminen.

**Taulukko 7.** FMEA -taulukko, jossa V = seurauksen vakavuus, E = vikamuodon esiintymisen todennäköisyys, H = vikamuodon havaitsemisen todennäköisyys ja VEH on näiden kolmen tulo. (O'Connor & Kleyner 2012 s.186)

Komponentti	Toiminto	Vikamuodot	Seuraukset	V	Syyt	E	Nykyiset toimenpiteet	H	V E H	Toimenpiteet	Vastuuhenkilö ja aikataulu

Seurausten vakavuus (V), vikamuodon esiintymisen todennäköisyys (E) ja havaitsemisen todennäköisyys (H) arvioidaan numeerisesti. Mahdolliset vakavuus- ja todennäköisyysasteikot määritetään tyypillisesti sovelluskohtaisesti niin, että suurin luku vastaa aina pahinta mahdollista tilannetta ja pienin vastaavasti vähiten huonoa vaihtoehtoa. Asteikko

on tavallisesti 1 - 10. Kolmen edellä mainitun kertoimen tulo, VEH, on niin kutsuttu riskiluku (*Risk priority number, RPN*). Riskiluku kertoo, mitkä vikamuodot ovat luotettavuuden kannalta kriittisimpiä.

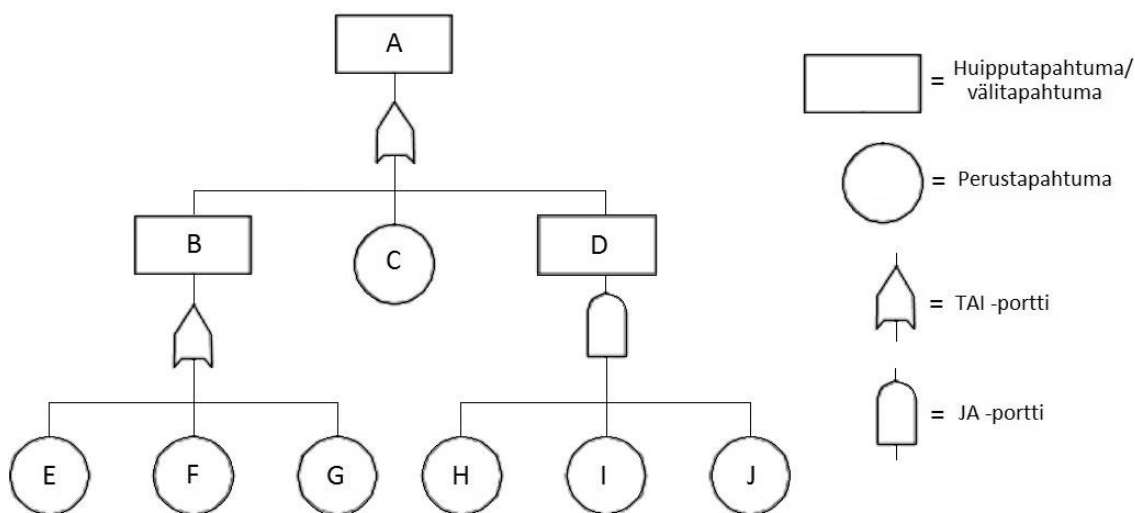
FMEA:ta voidaan hyödyntää vikamuotojen etsimisen lisäksi testisuunnitelman laatimisen tukena. Taulukosta nähdään suurimpien riskilukujen vikamuodot, jolloin mahdollinen testaus voidaan suunnata näiden vikamuotojen todentamiseen. Riskiluvun lisäksi on hyvä huomioida myös suurimpien vakavuuskertoimien vikamuodot. Tällöin varmistetaan, että vakavuudeltaan kriittiset vikamuodot tulee huomioitua siltäkin varalta, että niiden esiintymisen tai havaitsemisen todennäköisyys on arvioitu väärin. (Biolini 2010, Cristaldi et al. 2011)

### 4.3.2 Vikapuuanalyysi, FTA

FTA on vikaantumisorientoitunut analyysintapa, kuten FMEA. Siinä systeemiä lähestytään kuitenkin ylhäältäpäin. Ajit et al. (2010) toteavat FTA -analyysin perustuvan lyhytnäköisyyteen. Tällä tarkoitetaan sitä, että huipputapahtumasta ei hypätä suoraan juurisyyhyn, vaan tilannetta lähdetään purkamaan tapahtuma kerrallaan. Näin on todennäköisempää, että kaikki vuorovaikutussuhteet ja niiden seuraukset tulee otettua huomioon.

Analyysin lähtökohtana on systeemiin kohdistuva ei-toivottu huipputapahtuma, jota lähdetään purkamaan askel askeleelta kohti komponenttitasoa. Huipputapahtumaksi voidaan valita jokin tietty vikamuoto tai jos systeemin karkeampi arviointi riittää, voidaan huipputapahtumaksi valita yleisesti systeemin vikaantuminen. Lopputuloksena saadaan huipputapahtumasta liikkeelle lähtevä lukuisten yksittäisten tapahtumien summa, jota kuvataan puumaisella rakenteella. Huipputapahtuman sekä väli- ja perustapahtumien vuorovaikutussuhteita kuvataan logiikkaporttien avulla, joista yleisimmin käytettyjä ovat JA ja TAI -portit. Logiikkaportteja on useita, mutta suurin osa vikaista voidaan kuvata kuvassa 14 näkyvien neljän symbolin avulla. Kuvassa 14 on esimerkki tyypillisestä vika-  
puusta. Ajit et al. (2010) on listannut FTA prosessin vaiheet:

1. Systeemin määrittäminen
2. Tavoitteiden, huipputapahtuman ja analyysin tarkastelunäkökulman määrittäminen
3. Vikapuun laatiminen
4. Laadullinen vikaapuun arviointi
5. Määrällinen vikaapuun arviointi
6. Tulosten tulkinta ja esittäminen



**Kuva 14.** Tyypillinen vikapuu sekä tavallisimpien tapahtumien ja porttien piirrosmerkit (RoyMech 2014)

Kuvasta nähdään, että välitapahtuma B toteutuu, jos jokin perustapahtumista E, F tai G toteutuu. Välitapahtuma D toteutuu puolestaan vain, kun kaikki kolme perustapahtumaa H, I ja J toteutuvat samanaikaisesti. Huipputapahtuma toteutuu, jos jokin tapahtumista B, C tai D toteutuu.

FTA soveltuu vikamuotojen kartoittamisen sijaan tilanteisiin, joissa halutaan selvittää tiettyyn vikaantumistapahtumaan (huipputapahtuma) johtaneet syyt. Syyt voivat olla lähöisin niin inhimillisistä virheistä, ohjelmistovioista kuin mistä tahansa muista tapahtumista, jotka lopulta johtavat huipputapahtumaan. Systeemin kannalta väärän huipputapahtuman valinta voi johtaa väärin arvioihin ja sitä kautta myös väärin johtopäätöksiin. (Ajit et al. 2010) FTA on perusluonteeltaan laadullinen menetelmä, joka tarjoaa hyödyllistä tietoa ei toivottuun huipputapahtumaan johtavista vaihtelevista syistä. Laadullinen analyysi kuvaa tapahtumasarjan huipputapahtumaan minimaalisin askelin. Kuten FTA prosessin vaiheista huomataan, vikapuusta saadaan myös määrällistä tietoa laskemalla jokaisen yksittäistapahtuman esiintymisen todennäköisyydet. Näiden summana, tulona tai molempien sekoituksena (riippuen käytetyistä logiikkaportteista) saadaan huipputapahtuman todennäköisyys. Ajit et al. (2010) toteavat, että samalla saadaan selville myös dominoivat tapahtumasarjat ja vikaantumisen kannalta tärkeät pohjatapahtumat. Perustapahtumien todennäköisyyksien epävarmuudet ovat tavallisesti suuria ja koska ne vaikuttavat kaikkiin muihinkin todennäköisyyksiin, ovat myös huipputapahtuman ja välitapahtumien epävarmuudet suuria. FTA:n määrällistä arviointia tulisi käyttää lähinnä todennäköisyyden kertaluokkien määrittämiseen eikä niinkään absoluuttisten arvojen selvittämiseen.

Toisinaan analyysin laatiminen voi vaatia yksinkertaistuksien ja oletuksien tekemistä. Jotta analyysin yhtenäisyys ja jäljitettävyys säilyy kaikissa tilanteissa, on erityisen tärkeää, että dokumentointi tehdään huolella. FTA -analysointimenetelmä on määritelty muun muassa seuraavissa standardeissa: IEC 61025/EN 61025 ja MIL-HDBK-338.

Cristaldi et al. (2011) toteaa FTA:n haasteista, että analyysin laajuus tulee rajata oikein, jottei vikapuusta tule liian suuri. Toisinaan jokin tietty tapahtuma voi ilmetä vikapuussa kahteen kertaan. Toisaalta taas vikapuusta ei välttämättä käy ilmi kaikki vikaantumissyiden seuraukset. Lisäksi vikapuu on työläs, jos tarkasteltavia huipputapahtumia on useita, sillä jokaiselle joudutaan laatimaan vikapuu erikseen.

### 4.3.3 Tapahtumapuuanalyysi, ETA

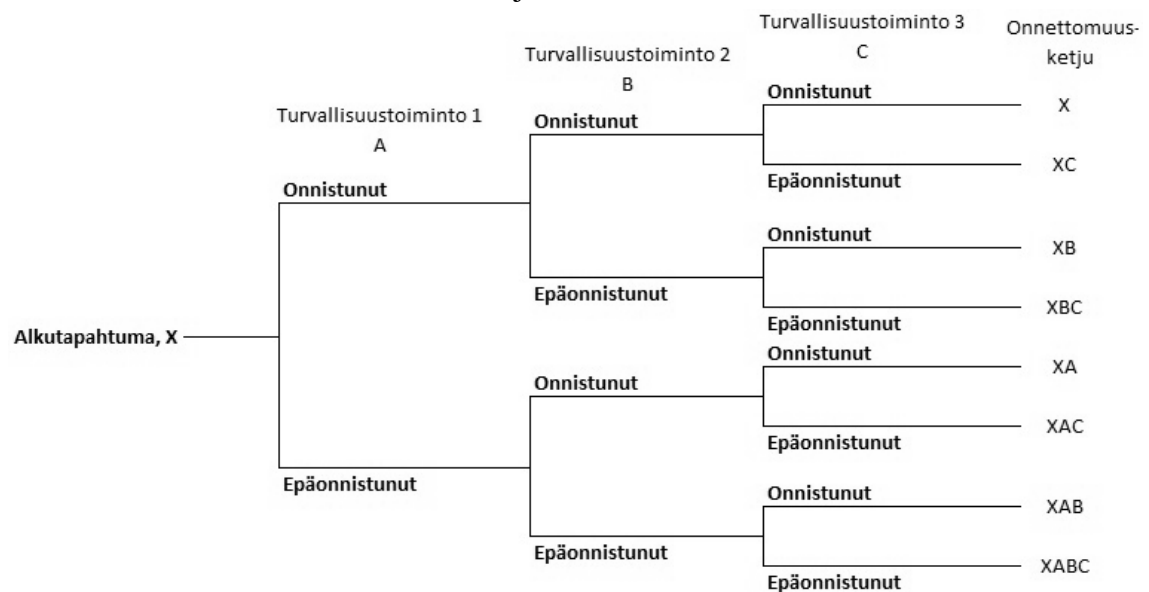
ETA yhdistää FMEA:n ja FTA:n hyvät puolet. ETA:ta voidaan käyttää FMEA:n tai FTA:n tukena ja laajentamaan niitä. Analyysin tarkastelulogiikka on alhaalta ylöspäin, kuten FMEA:ssakin. Birolinin (2010) mukaan se soveltuu riskianalyysin tekoon mille tahansa monimutkaiselle systeemille, joka vuorovaikuttaa niin sisäisten kuin ulkoisten tekijöiden kanssa. Perusideana ETA:ssa on selvittää, mitä tapahtuu, jos tietty alkutapahtuma (*Initial event*) toteutuu. Vastaus saadaan tutkimalla alkutapahtuman etenemistä. Alkutapahtuma on tapahtuma, josta tapahtumaketju alkaa kohti vikaantumista. (Birolini 2010)

ETA poikkeaa FTA:sta tarkastelulogiikan lisäksi lopputuloksen perusteella. Tapahtumapuu esittää yhden huipputapahtuman sijaan alkutapahtuman kaikki mahdolliset seuraukset. Ajit et al. (2010) mukaan ETA mahdollistaa useiden vikaantumissarjojen tunnistamisen ja niiden määrällisen arvioinnin esiintymistodennäköisyyksien avulla. Samalla todetaan, että vaikka riskimallin luominen pelkän vikapuun tai tapahtumapuun avulla on mahdollista, on se käytännössä hankalaa, jos kyseessä on todellinen kompleksi systeemi. Tästä syystä käytetään usein näiden yhdistelmää, jolloin vikapuu mallintaa systeemin yksittäiset seuraukset ja tapahtumapuu puolestaan vikaantumisen tapahtumasarjat suhteessa turvatoimintoihin. Jos eri välitapahtumille on kuitenkin saatavilla luotettavaa tietoa esiintymistodennäköisyyksistä, ei vikapuun laatiminen ole välttämätöntä.

Analyysin alussa tehdään kattava listaus alkutapahtumista. Alkutapahtuma voi olla sisäinen vika tai jokin ulkoinen tapahtuma. Sisäisiä vikoja aiheuttavat esimerkiksi laitteen vikaantuminen, ihmisen virheet tai ohjelmiston vikaantuminen. Ulkoisia tekijöitä ovat muun muassa toimintaympäristön ja muiden laitteiden aiheuttamat vuorovaikutukset. Yksittäisten alkutapahtumien analysointi kuluttaa paljon aikaa ja muita resursseja varsinkin, kun alkutapahtumien määrä on suuri. Tästä syystä alkutapahtumat jaotellaan ryhmiin (jos mahdollista) seurauksien perusteella. Ryhmät muodostuvat alkutapahtumista, joilla on samat seuraukset ja joiden estäminen vaatii samat turvallisuustoiminnot (*Safety functions*). Turvallisuustoiminnot ovat toimenpiteitä, joiden avulla estetään alkutapahtuman eteneminen vikaantumisen kannalta keskeisiin tapahtumiin. Tyypillinen tapahtumapuu on esitetty kuvassa 15. Ajit et al. (2010) mukaan ETA suoritetaan seuraavien vaiheiden avulla:

1. Alkutapahtumien listaus
2. Tarvittavien turvallisuustoimintojen määrittely

3. Alkutapahtumien mahdollinen ryhmittely
4. Ryhmän valinta
5. Turvallisuustoimintojen tilojen määrittäminen ja alustavan vikapuun luominen
6. Vikaantumiseen johtavien tapahtumasarjojen tunnistaminen sekä riippuvuuksien ja aikatekijöiden huomioon otto
7. Tapahtumasarjan keskeisten tapahtumien tunnistaminen
8. Kohtien 4 - 7 toistaminen kaikille alkutapahtumaryhmille
9. Lopullisen tapahtumapuun laatiminen
10. Kokonaissysteemin kannalta keskeisimpin tapahtumien tunnistaminen
11. Tulosten määrällinen tarkastelu ja dokumentointi



**Kuva 15.** Tyypillinen tapahtumapuu kolmella turvallisuustoiminnoilla: onnettomuusketju havainnollistaa epäonnistuneiden tapahtumien sarjan (Ajit et al. 2010)

Tapahtumapuu kuvataan tyypillisesti aikajärjestyksessä edeten alkutapahtuman turvallisuustoimintojen kautta lopputiloihin. Ajit et al. (2010) mukaan tapahtumapuu on tavallisesti binäärinen, jolloin turvallisuustoiminnoilla on kaksi eri tilaa: onnistunut (*Success*) ja epäonnistunut (*Failure*). Kuvassa 15 on kahdeksan ( $2^3$ ) lopputilaa. Onnettomuusketju havainnollistaa epäonnistuneiden tapahtumien sarjan. Esimerkiksi onnettomuusketju XBC syntyy, kun alkutapahtuma X toteutuu, Turvallisuustoiminto 1 onnistuu, Turvallisuustoiminto 2 epäonnistuu ja turvallisuustoiminto 3 epäonnistuu.

ETA mahdollistaa useiden tapahtumaketjujen tutkimisen ja niiden ajallisen arvioinnin. Analyysiä voidaan käyttää eri vaihtoehtoratkaisujen määrälliseen vertailuun ja se mahdollistaa alkutapahtumaa seuraavien tapahtumaketjujen kuvaamisen. Näiden avulla voidaan esittää toimenpiteitä seurauksien pienentämiseksi. Menetelmän rajoittavina tekijöinä on alkutapahtumien valinta ja määrittely, jotka vaikuttavat lopputulokseen. Toisinaan on lisäksi vaikea tunnistaa kaikkia mahdollisia tapahtumaketjuihin vaikuttavia teki-

jöitä. Tämä tulee esille erityisesti silloin, kun kyseessä on suuri ja monimutkainen tapahtumapuu. Samalla myös syy-seuraussuhteiden kuvaaminen vaikeutuu. (Ajit et al. 2010; Birolini 2010)

#### 4.4 Luotettavuustestauksen ja -analysoinnin rajoitteet

Sovellettaessa testaus- ja analysointimenetelmiä käytäntöön, tulee huomioida menetelmien rajoitteet. Luotettavuuden varmistaminen sisältää aina paljon epävarmuustekijöitä. Ympäristöolosuhteiden vaihtelevuus tuo myös omat haasteensa luotettavuuden varmistamiseen. Lisäksi nosturisovellus itsessään aiheuttaa rajoitteita menetelmien käyttöön.

Olosuhdetestauksessa tulee ottaa huomioon, että testauskammio vastaa harvoin täysin todellisia rasisolosuhteita. Tämä korostuu yksittäiseen ympäristöolosuhteeseen keskittyvässä testauksessa. Erot käyttö- ja testiympäristön välillä voivat vaikuttaa vikamekanismeihin. Vikaantumisia tarkastellessa tulisikin aina arvioida, voiko sama vikamuoto esiintyä myös todellisissa rasisolosuhteissa. Lisäksi harvoin on mahdollista testata kaikkia ympäristöolosuhdetekijöitä, joille komponentti tai laite altistuu käyttöympäristössään. Käytännössä testattavat olosuhdetekijät joudutaan valitsemaan perustuen arvioon siitä, millä rasisutekijöillä on suurimmat vaikutukset komponentin tai laitteen vikaantumiseen. Valintaperusteet tulee miettiä tarkoin, sillä niillä on puolestaan suuri merkitys testausprofiiliin. (Spec Technology Report No10 2000)

Tyypillinen virhe testausta aloittaessa on kiirehtiminen. Testaukseen kiirehditään suin päin, jolloin pohjatyön tekeminen jää vähäiseksi. Tämä voi kostautua testaus- tai tulosten arviointivaiheessa, kun jokin oleellinen tieto on jäänyt mittaamatta ja merkitsemättä ylös tai onkin testattu täysin väärää asiaa tai väärällä tavalla. Esimerkiksi joissain tilanteissa olisi tärkeää tietää komponentin todelliset alkuperäiset dimensiot. Vikaantumisen jälkeen näitä on mahdotonta selvittää, sillä useimmat vikamuodot aiheuttavat muutoksia dimensioihin. Toisaalta voidaan myös kiirehtiä ALT ja HALT testauksen sijaan suoraan demonstraatiotesteihin. ALT ja HALT testaus ovat kuitenkin useimmiten se nopein tapa parantaa luotettavuutta. Demonstraatiotestaus tulisi tehdä vasta, kun oletetaan laitteen luotettavuuden olevan tietyllä tasolla.

Dokumentoinnilla on myös merkittävä rooli tulosten tarkastelussa. Puutteellinen dokumentointi onkin yksi yleisimmistä tulosten luotettavuutta rajoittavista tekijöistä. Testauksen aikana tehdyt huollot ja muut toimenpiteet tulisi aina kirjata tarkoin ylös, jotta ne voidaan huomioida johtopäätöksiä tehdessä.

Nosturien testauksessa on usein rajoittavana tekijänä näytteiden pieni määrä. Näytteitä on joko yksi tai enintään muutamia. Isommat näytekoot vaativat paljon resursseja, kuten tilaa, aikaa ja rahaa. Tilastollisessa mielessä tarvittaisiin kuitenkin kymmeniä näytteitä. Lisäksi on tyypillistä, että testaus tehdään protolaitteelle, joka ei vastaa kaupallista laitetta kaikilta mekaanisilta ja sähköisiltä osiltaan. Protolaite valmistetaan yksittäiskappaleena,

jolloin se on usein kaupallisia laitteita huolellisemmin valmistettu. Protolaite voi siis läpäistä testit, joita kaupallinen laite ei läpäisisi. Lisäksi tällä hetkellä testauksessa käytetty kuormitustapa vastaa huonosti todellisuutta. Tyypillisesti testaus tehdään vakiokuormalla, sillä vaihtuvalla kuormalla suoritettu testaus on huomattavasti hankalammin toteutettavissa. Todellisuudessa nosturilla nostetaan useimmiten vaihtelevia kuormia.

Analysointimenetelmien käytön rajoitukset perustuvat pääasiassa matemaattisten mallien, käytetyn tietoaineiston ja analysointimenetelmien tarkkuuden määäämiin tekijöihin. Matemaattisten mallien käyttö perustuu fysiikan lakeihin ja laskukaavoihin. O'Connor & Kleyner (2012) toteavat, että laskennallisten ongelmien määrä heikentää ennustuksen luotettavuutta, kun systeemin komponenttien määrä on suuri. Tällöin virheiden ja muunnelmien määrä kasvaa, joka lisää epävarmuutta ja voi johtaa vääränlaisiin johtopäätöksiin. Samalla todetaan, että matemaattiset mallit soveltuvat huonosti luotettavuuden arviointiin ja niiden käyttö on tehnyt paljon hallaa luotettavuustekniikan uskottavuudelle (O'Connor & Kleyner 2012).

Luotettavuuden analysointi käyttöön perustuvan tiedon perusteella vaatii puolestaan suuren määrän tietoaaineistoa. Mittaustietoa tarvitaan huomattavasti enemmän tilastollisten vaikutussuhteiden johtamiseen mittaustuloksista kuin teoreettisessa mallissa. Epävarmuuden määrä on suuri, sillä näytettä voidaan harvoin pitää täysin koko populaatiota kuvaavana. Esimerkiksi eliniän tarkkaa arvoa ei saada selville, vaan ainoastaan sen jakauma. Lisäksi epävarmuuden määrä kasvaa sitä mukaa mitä tarkemmalla tasolla systeemiä tarkastellaan.

Käytettävän tietoaaineiston luotettavuus tulee myös varmistaa. Tietoaaineisto voi olla huolto-, elinikä- tai takuutietoa. Näiden kohdalla on hyvä miettiä muun muassa, mikä lasketaan vikaantuneeksi ja mikä ei, liittyykö käyttöön väärinkäytöksiä tai onko laitetta huollettu välissä ja jos on, onko siitä tehty tarvittava dokumentointi. On myös yleistä, että todellinen käyttöaikatieto puuttuu eikä laitteisiin kohdistuneita todellisia ympäristöolosuhteita ole dokumentoitu. (O'Connor & Kleyner 2012)

Analysointimenetelmät ottavat huonosti huomioon ajasta riippuvan ominaisuuksien heikkenemisen. Analysoinnin tarkkuus onkin parhaimmillaan ajasta riippumattomissa ja syklistä prosesseissa. Esimerkiksi sää on ajasta riippuvainen, jolloin tarvitaan useita mittauksia ennen kuin voidaan tehdä ennusteita sen perusteella. Johtimessa kulkeva virta on puolestaan ajasta riippumaton. Johtimessa kulkeva virran määrä voidaan mitata, jonka jälkeen voidaan olettaa, että se pysyy samana, ellei olosuhteita muuteta. Tällöin jo muutama mittaus riittää ennusteen tekemiseen. (O'Connor & Kleyner 2012)

## 5 LUOTETTAVUUDEN VARMISTUS KÄYTÄNNÖN SOVELLUKSISSA

Komponentin tai systeemin luotettavuuden tarkastelu ympäristöolosuhteiden vaikutusten kannalta aloitetaan aina rasitustekijöiden määrittämisellä huolimatta siitä, käytetäänkö arviointi- vai testausmenetelmää. Rasitustekijöiden määrittämisessä tulee ottaa huomioon laitteen tai komponentin elinkaaren kaikki eri ympäristöt: kuljetus-, varastointi- ja käyttöolosuhteet. Olosuhteet ja niiden rasitustekijät tulisi määrittää realistisesti. Rasitustekijöitä aliarvioidaan herkästi, jotta saavutettaisiin säästöjä komponenttien valinnoissa. Tämä on kuitenkin väärä tapa, joka voi kostautua kalliisti.

Analysointimenetelmiä hyödynnetään tyypillisesti joko yksinään tai pohjana testisuunnitelman laatimiselle. Tilanteesta riippuen valitaan sopiva analysointimenetelmä: halutaanko selvittää tiettyyn vikaantumiseen johtavat tekijät vai tarkastelun kohteen eri vikamuodot. Analysointimenetelmän hyödyntämisen jälkeen siirrytään mahdolliseen testaukseen. Testauksen kannalta olennaiset elinkaaren rasitustekijät tulisi olla selvitetty jo analysointimenetelmän soveltamisen yhteydessä. Analysointimenetelmän avulla on myös saatu selville mahdollisia vikamuotoja ja niiden todennäköisyyksiä. Näiden avulla testaus voidaan suunnata luotettavuuden kannalta olennaisiin tekijöihin.

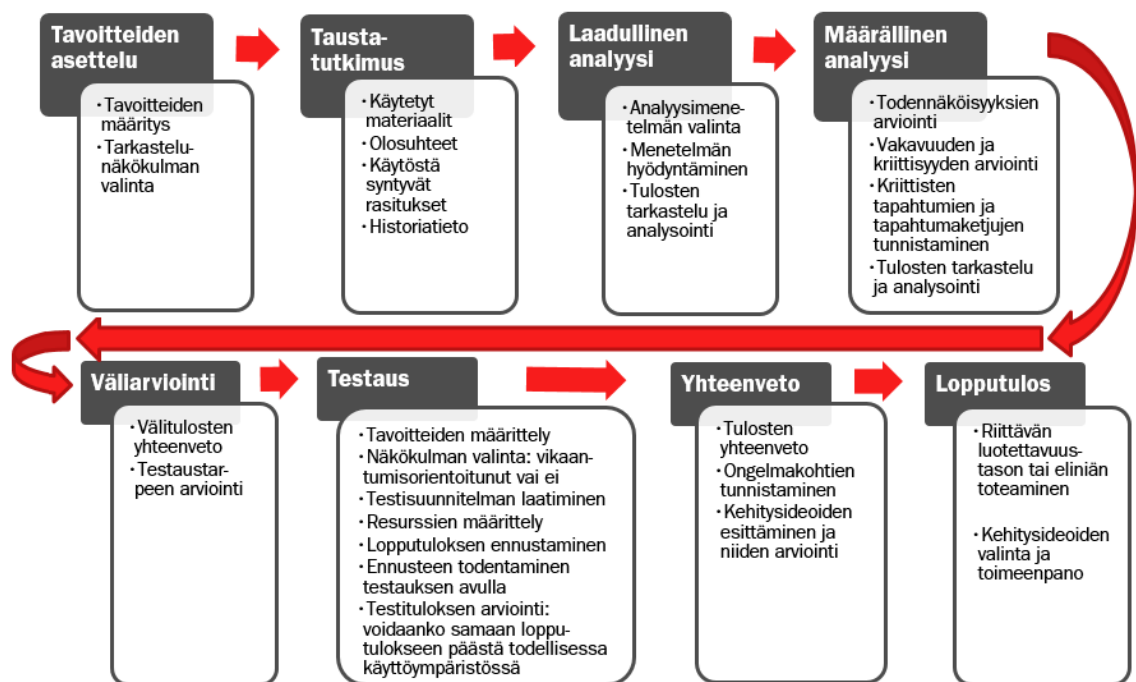
Onnistuneen olosuhdetestaussuunnitelman laatiminen vaatii hyvää tuntemusta eri käyttöympäristöistä sekä niiden rasitustekijöiden vaikutuksista yhdessä ja erikseen. Esimerkiksi MIL- HDBK-781A ohjeistaa, kuinka ympäristöolosuhteet määritetään ja miten testit suunnitellaan niiden mukaisesti. O'Connor & Kleyner (2012) toteavat, että useissa tilanteissa kokemuksella on suuri merkitys oikeanlaisen testisuunnitelman valinnassa. He painottavat, että oikeanlaisen testaussuunnitelman laatimisessa tulee ottaa huomioon ainakin seuraavat viisi asiaa:

1. Ympäristöolosuhteiden ääriarvojen suuruuden (minimi/maksimi) lisäksi myös niiden muutosnopeus: esimerkiksi suuret lämpötilan muutokset voivat aiheuttaa väsymistä komponenteissa ja murtumia eri materiaalien liitoksissa.
2. Toiminnan ja lepotilan olosuhteet suhteessa ympäristön olosuhteisiin: esimerkiksi kosteuden kondensoituminen pinnoille voi olla suurempi ongelma laitteen ollessa levossa, kun sen pintalämpötila laskee.
3. Ympäristöolosuhteiden yhteisvaikutus: monissa tilanteissa yhteisvaikutus on huomattavasti rasittavampi, kuin samojen rasitusten vaikutukset erikseen.
4. Tärinän ja shokkien suunta ja muodot: usein testauksessa kannattaa käyttää satunnaista tärinää, jotta erilaiset resonanssit tulee katettua samanaikaisesti.
5. Tietyt laitteelle ominaiset olosuhteet toimintaympäristön lisäksi: esimerkiksi varastointi- ja kuljetusolosuhteet.



Samalla tulee muistaa, että jopa yksinkertaisella systeemillä voi olla useita tärkeitä jännitysjakautumia ja niiden vuorovaikutuksia. Jokin tietty tekijä voi johtaa vikaantumiseen yhdessä tilanteessa, mutta ei johdakaan siihen toisessa. Juuri tästä syystä luotettavuuskirjallisuudessa painotetaan testauksen keskittämistä vikamekanismien löytämiseen ja sitä kautta laitteen kehittämiseen ennemmin kuin eliniän määrittämiseen simuloitujen olosuhteiden perusteella. Todellisuudessa kuitenkin useimmissa tilanteissa luotettavuustestauksella ymmärretään tarkoitettavan juuri eliniän määrittämiseen tähtäävää testausta. (O'Connor & Kleyner 2012)

Ympäristöolosuhteiden kartoituksen jälkeen edetään lopputuloksen arvioimisvaiheeseen. Testauksen lopputulos pyritään arvioimaan mahdollisimman tarkasti ja testaus on vain väline alkuperäisen arvioinnin todentamiseen. Lopputuloksen arviointi vaatii hyvää tuntemusta rasiustekijöiden lisäksi itse laitteesta tai komponentista. Kaikki yksityiskohdat tuotteen materiaaleista valmistusprosessiin tulee olla tunnettuja. Näiden tietojen pohjalta voidaan tehdä testauksessa syntyvien vikojen ja vaurioiden ennustaminen. Tämän jälkeen luodaan testiprofiili, joka tuottaa ennustetut vauriomekanismit. (Espec Technology Report No10 2000) Luotettavuuden varmistamiseen liittyviä eri vaiheita on havainnollistettu kuvassa 16, jossa on esitetty luotettavuuden varmistusprosessi.



Kuva 16. Luotettavuuden varmistusprosessi

Tässä esitetty luotettavuuden varmistusprosessi laadittiin kirjallisuusselvityksen perusteella. Siihen on kiteytetty luotettavuuden varmistusprosessin eri vaiheet selkeäksi kokonaisuudeksi edeten taustatietojen keräämisestä analysointimenetelmien käyttöön ja siitä edelleen mahdollisesti testaukseen. Lopussa tarkastellaan tuloksia, ja tehdään niiden perusteella tarvittavat johtopäätökset. Lopputuloksena voi olla riittävän luotettavuustason

toteaminen, tai vastaavasti tarvittavien parannusideoiden esittäminen, valinta ja toimeenpano. Luotettavuuden varmistusprosessi on ohjeellinen. Vaiheita voidaan muokata tai jättää kokonaan välistä tilanteesta ja tarpeesta riippuen.

## 5.1 Mekaaniset komponentit

Ajit et al. (2010) mukaan aikaisemmin mekaaniset komponentit ylimitoitettiin, jotta voitiin olla varmoja niiden luotettavuudesta. Nykyään erilaiset suunnitteluohjelmat mahdollistavat hyvin tarkat laskelmat kuormista ja rakenteen kantavuudesta. Tämä puolestaan mahdollistaa merkittävät säästöt materiaalikustannuksissa, mutta toisaalta se on johtanut paljon pienempiin varmuusrajoihin ja myös luotettavuusongelmien syntyyn.

Mekaanisten komponenttien luotettavuuteen vaikuttavia suunnittelutekijöitä ovat valitut materiaalit (lujuusominaisuudet, väsymis- ja virumiskäyttäytyminen), rakenne, pinnoitteet ja valmistusmenetelmät. Ympäristön rasitustekijöistä puolestaan vaikuttavat mekaaniset jännitykset, kuluminen, korroosio, värinä ja iskut sekä lämpötila. (O'Connor 2001)

Mekaanisen kestävyuden testaaminen on tyypillistä kuormaa kantavilla komponenteilla. Tällaisia komponentteja nosturissa ovat muun muassa köysi, ketju, köysi- ja kantopyörät, akselit ja hammaspyörät. Näiden testaaminen painottuu kuitenkin usein enemmän materiaalitutkimuksen ja laadunvarmistuksen puolelle. Tämä johtuu siitä, että mekaanisen komponentin luotettavuudesta voidaan todeta paljon jo pelkästään sen materiaaliominaisuuksien perusteella, varsinkin jos komponentin rakenne on hyvin tunnettu entuudestaan. Luonnollisesti mekaanisten komponenttien luotettavuuteen vaikuttaa materiaaliominaisuuksien lisäksi myös muita tekijöitä. Näiden testaaminen tulee ajankohtaiseksi, kun muutetaan vanhaa rakennetta tai luodaan täysin uutta. Tällöin voidaan testata esimerkiksi kulmien pyöristysäteiden, voiteluaineiden ja niiden vanhenemisen tai komponentin lämpenemisen vaikutusta luotettavuuteen olosuhdetestauksen avulla.

Nosturin mekaanisten komponenttien vikaantuminen on hyvin tunnettua. Lisäksi uudetkin rakenteet noudattavat usein jo hyviksi todettuja ratkaisuja. Tästä johtuen nosturin mekaanisille rakenteille tehtävä olosuhdetestaus on pääosin elinikätestausta, jolla varmennetaan, että luotettavuus on vaadittavalla tasolla. FEM 9.852 (1998) standardissa esitellään yksi tapa suorittaa nostimen elinikätestaus. Siinä kiihdytys tehdään maksiminostosyklien ja -kuormien avulla. Standardissa on määritelty minimivaatimukset kokonaisen nostimen testaukseen. Nostimen elinikää vastaavien nostotuntien määrä on riippuvainen sen käyttöluokituksesta. Käyttöluokitus kuvastaa nostimella nostettujen kuormien suuruuden jakautumista ja keskimääräisiä päivittäisiä nostotunteja FEM 9.511 (1986) mukaisesti. Testi lasketaan onnistuneeksi, jos vähintään kolmen testinostimen saavutettu keskimääräinen elinikä on yli testille määritellyn täyden kuorman nostotuntien määrän. Tämä kuitenkin niin, että huonoin tulos on enintään 10 % alle vaaditun arvon. Vaihtoehtoisesti, kun testattavia nostimia on vain yksi, on testi onnistunut, kun nostin on saavuttanut 20 % ylityksen täyden kuorman nostotuntien ohjearvoon.

On huomattava, että testauksen luotettavuus on pieni testilaitteiden vähäisestä määrästä johtuen. Lisäksi muiden ympäristöolosuhteiden, kuten kosteuden tai lämpötilan, huomiointi vaatii erillisiä testejä. Nosturivalmistajan ei ole pakollista noudattaa FEM-standardia. Toisinaan asiakas voi kuitenkin vaatia sen noudattamista.

## 5.2 Elektroniikkakomponentit

Ajit et al. (2010) mukaan tekniikan kehittyminen on johtanut siihen, että lähes kaikki turvallisuuskriittiset komponentit tai systeemit sisältävät elektronisia komponentteja. Näin on myös nosturisovelluksissa. Elektroniikkatuotteiden tutkimisen tekee haastavaksi se, että ne ovat tyypillisesti eristettyjä tai kapseloituja. Niiden luotettavuus on lisäksi vaikeammin ennustettavissa kuin mekaanisten komponenttien kohdalla. Komponentti voi toimia valmistuksen jälkeisessä testauksessa, mutta hajota nopeasti käytössä (esimerkiksi viallisen liitoksen aiheuttamana). Elektroniikkalaitteet tulisi mahdollisuuksien mukaan testata aina jännitteisenä, mikä puolestaan lisää testauksen haasteellisuutta ja luo vaatimuksia testilaitteistolle. (VTT 2007)

Elektroniikkalaitteiden suurimmat räsitusetekijät ovat lämpötila, kosteus ja epäpuhtaudet. Näistä merkittävin on lämpötila. Birolini (2010) toteaa, että sähkökomponentin suorituskyky sekä elinikä laskevat, kun lämpötila nousee. Kosteus aiheuttaa muun muassa korroosiota ja ionien vaellusta (whiskersien kasvu). Kosteaa sähkökomponentin juottaminen voi johtaa sisäisten jännitysten kasvuun, komponentin turpoamiseen ja säröilyyn kosteuden höyrystyessä. Epäpuhtaudet puolestaan aiheuttavat oikosulkuja sekä jäähtytinpuhaltimien tukkeutumisia ja sitä kautta lämmön nousua. Lisäksi sähkökomponenttien luotettavuuteen vaikuttavat komponenttien sijoittelu ja kiinnitys, juotosten laatu sekä komponentin kesto siihen kohdistuvien sähköisten rasitusten kannalta. Syöttöjännitteen piikit voivat olla myös haastavia. Suomessa syöttöjännite on pääosin hyväksyttävällä tasolla, muualla se voi sen sijaan vaihdella. Mekaanisia vaurioita aiheuttavat puolestaan värinät ja iskut sekä olosuhteiden vaihtelut. (VTT 2007)

Tässä työssä elektroniikkalaitteiden ympäristöolosuhteiden aiheuttamaa vikaantumista on havainnollistettu soveltamalla edellä esitettyjä luotettavuuden varmistusmenetelmiä kahdelle eri sähkölaitteelle: kunnonvalvontalaitte 1 ja 2. Molemmat kunnonvalvontalaitteet ovat komplekseja systeemejä. Kunnonvalvontalaitteet on kuvattu niiden tärkeimpien toiminnallisten komponenttien avulla. Todellisuudessa jokainen näistä komponenteista koostuu vielä useista pienemmistä komponenteista (releet, liittimet, mikroprosessorikomponentit, vastukset, kondensaattorit ja niin edelleen), jolloin vikaantumismahdollisuuksia on monia. FMEA:n tekeminen näin laajalle kokonaisuudelle ei ole enää järkevää, kun tekemiseen tarvittava aika suhteessa FMEA:sta saatavaan hyötyyn on liian suuri. Lisäksi FMEA mallintaa huonosti ympäristöolosuhteiden vaikutuksia tarkasteltavaan laitteeseen. FTA:n hyödyntäminen olosuhteenäkökulmasta soveltuu paremmin vikaantumisen kartoittamiseen, mutta senkin hyödyntäminen vaatii yleistysten tekemistä. Tämä johtuu juuri

laitteen kompleksisuudesta sekä siitä, että elektroniikkalaitteen vikaantumista on huomattavasti vaikeampi analysoida kuin mekaanisen laitteen. Vikamuotoja on useita ja niiden todentaminen on harvoin mahdollista. FTA soveltuu paremmin juuri kohteisiin, joissa vikamuotoihin johtaneiden syiden havaitseminen on vaikeampaa.

### 5.2.1 Kunnonvalvontalaite 1

Ensimmäisenä sähkölaite-esimerkkinä käsitellään kunnonvalvontalaite 1, KVL1. Yksinkertaisuudessaan laitteen tehtävänä on tarkkailla toiseen laitteeseen syötettyä virtaa. Virtakäyrän muodon perusteella saadaan tietoa tarkasteltavan laitteen kunnosta, kuten sen mekaanisen kulumisen määrästä. Laite toimii, kun sen tarkkailtava laite toimii ja muulloin se odottaa. Jos laite havaitsee tarkasteltavassa laitteessa poikkeaman, se välittää tiedon eteenpäin. KVL1 koostuu karkeasti seuraavista osista: virranmittaus, ohjaussignaalinluku, rele -ulostulot, prosessori, Ethernet ja virransyötön sisääntulo. Näistä sisääntuloiksi voidaan laskea mittaussuureet (virranmittaus ja ohjaussignaalinluku) sekä virransyötön sisääntulo. Virransyötön sisääntulon kautta KVL1 saa virtaa toimiakseen. Ohjaussignaalinluku tarkkailee, koska tarkasteltavaa laitetta käytetään ja välittää tiedon, milloin virtaa tulisi mitata. Virranmittauskomponentti puolestaan mittaa ohjaussignaalin mukaisesti tarkasteltavan komponentin input -virtaa. Ulostuloja ovat puolestaan Ethernet ja releet. Prosessori hoitaa kommunikoinnin eri komponenttien välillä. Virranmittaus- ja ohjaussignaalinmittauskomponenttien toiminta on olennaista laitteen vikaantumisen kannalta. Releiden tai Ethernetin vikaantuminen estää ainoastaan kyseisen ulostulon kanssa kommunikoinnin, mutta se ei häiritse laitteen muuta toimintaa. Tästä huolimatta releet ja Ethernet ovat yhtä tärkeitä laitteen toiminnan kannalta, sillä juuri niiden välittämän tiedon avulla parannetaan luotettavuutta.

KVL1 on vielä kehitysasteella eikä tarkkoja päätöksiä sen valmistuspaikasta tai sitä seuraavista kuljetuksista tai varastoinneista ole tehty. Tiedetään kuitenkin, että valmistusta tulee todennäköisesti seuraamaan useamman päivän kuljetus meriteitse, jonka lisäksi suhteessa lyhyempiä matkoja maanteitse. Merikuljetus tapahtuu satamakontissa ja laite tullaan pakkaamaan säänkestävästi kuljetusten ajaksi. Näillä tiedoilla valmistus-, kuljetus- ja varastointiolosuhteiden määrittäminen on kuitenkin mahdotonta, mistä syystä tässä työssä perehdytään lähinnä käyttöolosuhteiden vaikutuksiin.

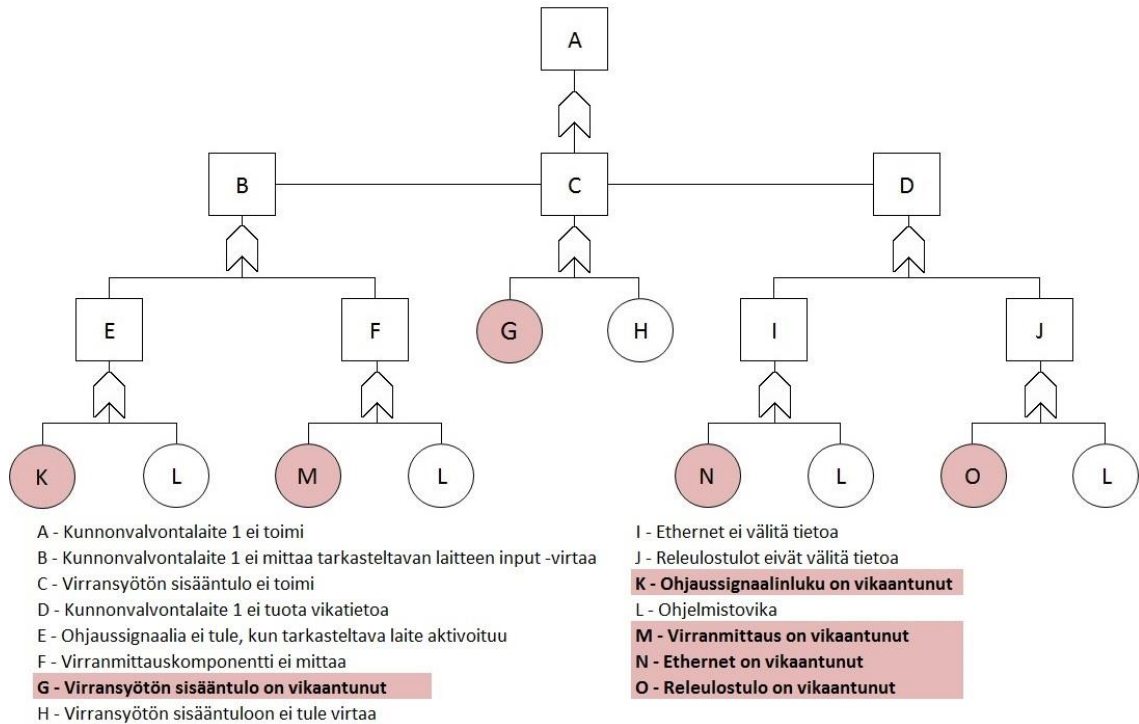
KVL1 on suljettu muovikoteloon, jonka kotelointiluokka on IP20. Standardin SFS-EN 60529 (2000) mukaan tämän luokituksen kotelo estää halkaisijaltaan 12,5 mm vieraiden esineiden sisäänpääsyn. Kotelo ei suojaa laitetta kosteudelta millään tasolla. Laite on sijoitettuna nosturin sähkökaappiin, jonka kotelointiluokka on puolestaan IP65. Tämä luokitus vastaa pölytiivistä sekä vesisuihkulta suojaavaa koteloa.

Käyttöympäristössään KVL1 altistuu vain vähäiselle lämpötilan vaihtelulle. Sähkökaapin lämpötila pidetään tyyppillisesti vakaana ilmastoinnin avulla. Laitteelle määritellyt minimi- ja maksimilämpötilat ovat -20 ja +60 °C. Vastaavat varastoinnin ääriarvot ovat -40

ja +80 °C. Varastointiolosuhteilla ei tarkoiteta pelkästään laitteen kirjaimellista varastointiaikaa, vaan siihen lasketaan kaikki se aika, jolloin laite on pois toiminnasta. Korkealle ilmakeudelle, tiivistyneelle kosteudelle, korkealle lämpötilalle, matalalle lämpötilalle tai lämpötilan ja kosteuden sykliselle vaihtelulle laite altistuu ainoastaan vikatilanteissa. Laitteen sijainnista johtuen se altistuu käytön yhteydessä tärinälle ja shokeille. KVL1 sijaitsee tyypillisesti vaunun sähkökaapissa. Tärinää aiheutuu aina, kun vaunu liikkuu sillalla, silta liikkuu kiskoilla tai nostin nostaa kuormaa. Vaunun sähkökaapin sisälle laite on sijoitettu kontaktorien kanssa samaan kiinnityskiskoon. Kontaktorien kytkeytyessä päälle tai pois, syntyy iskumainen jännitys kiinnityskiskoon, jonka kautta nämä iskut välittyvät myös KVL1:seen. Lisäksi laitteessa on korkeita jännitteitä. KVL1:n käyttöjännite on 24 V. Ohjaussignaalinmittauskomponentin ja releiden jännite on maksimissaan 230 V. Virranmittauskomponentti mittaa tarkkailtavan laitteen jännitettä, joka puolestaan on maksimissaan 600V. Sähkömagneettisia häiriöitä kohdistuu laitteeseen vain vähän, sillä laite sijaitsee ohjaussähköpuolella, joka on sähkömagneettisen häiriön suhteen niin kutsuttu turvallinen puoli. Esimerkiksi tilanteessa, jossa valtakunnan verkosta tulee jännitepiikki, on sen ja KVL1:n välillä monta tekijää, jotka todennäköisesti suodattavat piikin ennen sen päätymistä KVL1:een. Korkeille jännitepiikeille laite voi kuitenkin altistua asennuksen yhteydessä.

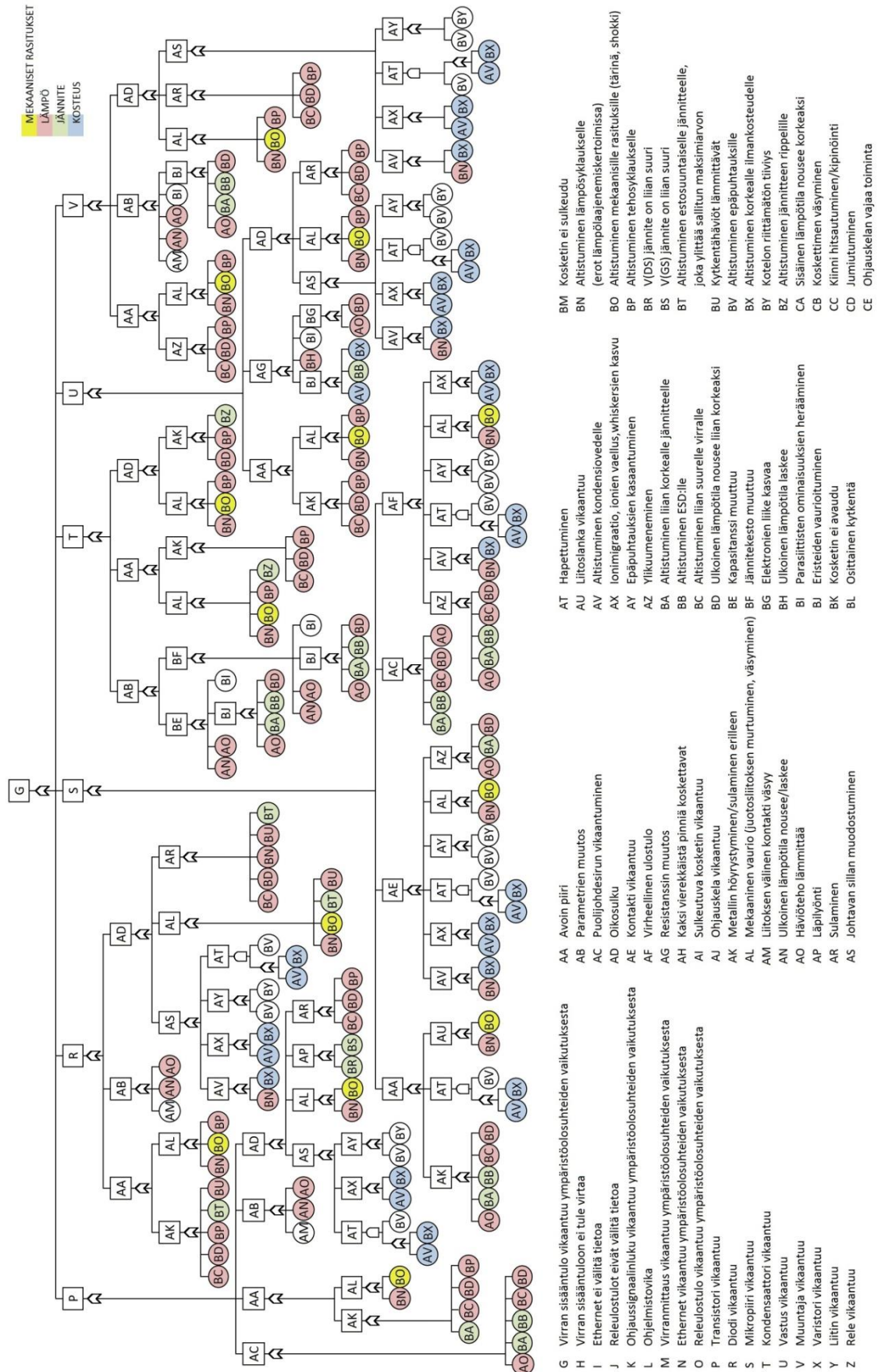
KVL1:n tavoite-elinikä vastaa tarkasteltavan laitteen elinikää, joka voi vaihdella käytöstä riippuen vuodesta 20 vuoteen. Voidaan olettaa, että vikaantumistilanteessa KVL1 vaihdetaan kokonaisuudessaan uuteen, sillä korjaamiskulut ovat todennäköisesti vaihtokustannuksia suuremmat. KVL1 lasketaan siis luotettavuustarkastelussa vaihdettavaksi komponentiksi. KVL1:n käyttö mahdollistaa huollosta tai vikaantumisesta johtuvien seisokkien välttämisen, minimoimisen tai paremman ennustettavuuden.

Kuvassa 17 on esitetty karkeasti KVL1:n vikapuu lähtien huipputapahtumasta ”Kunnonvalvontalaite 1 ei toimi” ja päättyen viiden toiminnan kannalta kriittisen komponentin vikaantumiseen, ohjelmistovikaan tai siihen että virran sisääntuloon ei tule ollenkaan virtaa.



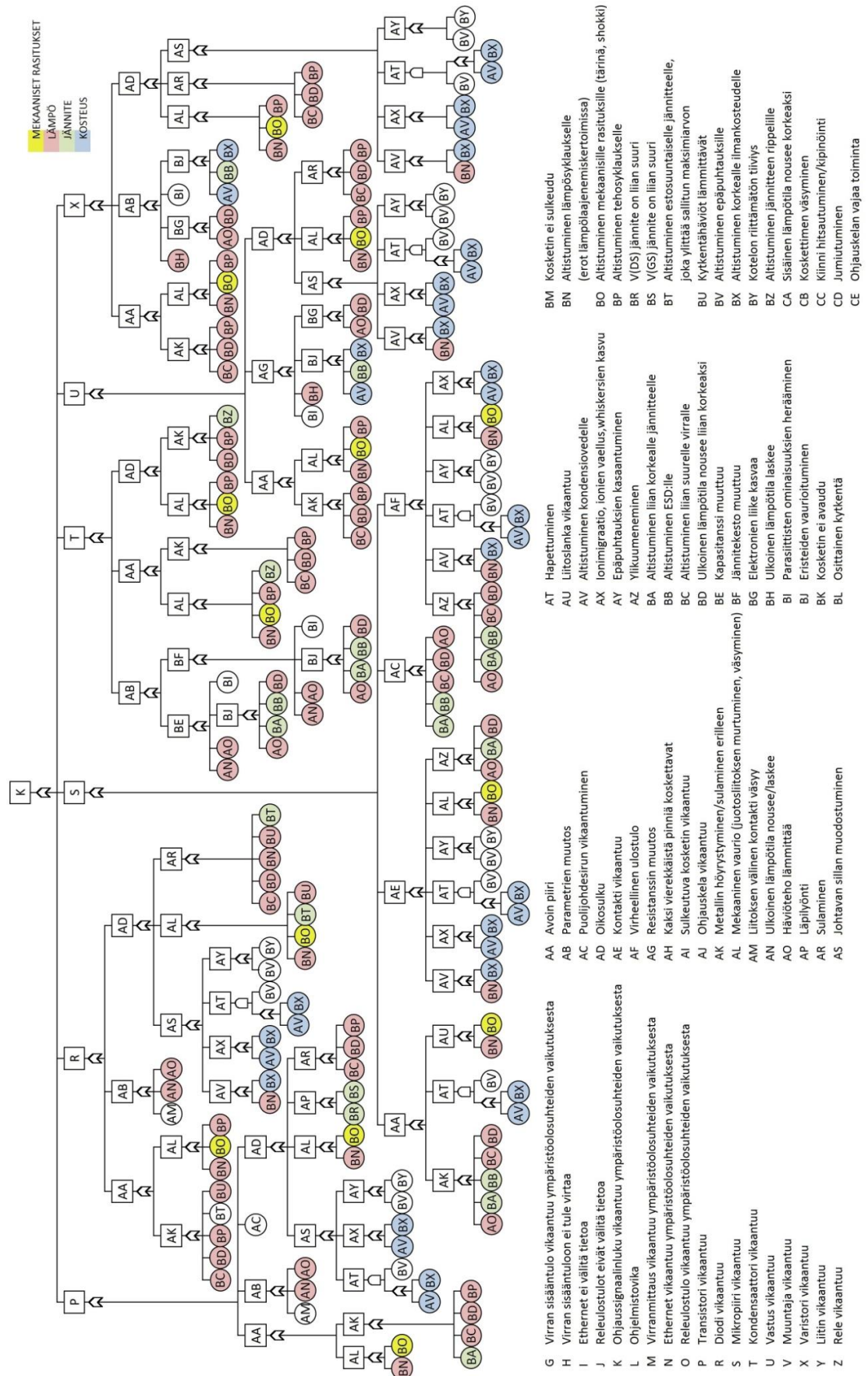
Kuva 17. KVL1: vikapuu

Välitapahtuman B toteutuminen vaatii joko välitapahtuman E tai F toteutumisen. Välitapahtuman C toteutuminen vaatii puolestaan perustapahtuman G tai H toteutumisen. Välitapahtuman D toteutuminen taas vaatii joko välitapahtuman I tai J toteutumisen. Huipputapahtuma A toteutuu, jos jokin edellä mainituista toteutuu. Perustapahtuman H (Virransyötön sisääntuloon ei tule virtaa) voidaan todeta olevan riippuvainen KVL1 ulkopuolisista tekijöistä ja siitä syystä se ei kuulu tämän työn tarkastelualueeseen. Samoin perustapahtuma L (Ohjelmistovika) jätetään tarkastelematta, sillä tyypillisesti ohjelmistoviat eivät ole riippuvaisia olosuhdetekijöistä. Kuvassa perustapahtumiin G, K, M, N ja O vaikuttavat olosuhdetekijät ovat kiinnostavia KVL1:n luotettavuustarkastelun kannalta. Selkeyttämiseksi karkea KVL1:n vikapuu on katkaistu näihin tapahtumiin. Jokaisen kriittisen komponentin vikapuut on esitetty erikseen kuvissa 18 - 22. Vikapuissa huipputapahtuman toteutumisesta on käsitelty eri komponenttien vikaantumisen näkökulmasta. Vikaantumiseen johtavia perustapahtumia on useita ja sama rasitus voi olla usean eri vikaantumisketjun perustapahtumana. Tapahtumien nimeämisessä on käytetty kirjaintunnuksia, jotka ovat yhtenäisiä eri kuvien välillä. Sama kirjaintunnus tarkoittaa siis samaa tapahtumaa joka kuvassa. Eri rasiustekijöiden aiheuttamat perustapahtumat on kuvattu eri väreillä havainnollisuuden lisäämiseksi. Vikapuiden avulla saatiin esille vikaantumiseen johtavat tapahtumat ja vikaantumisen kannalta olennaiset olosuhderasitukset.



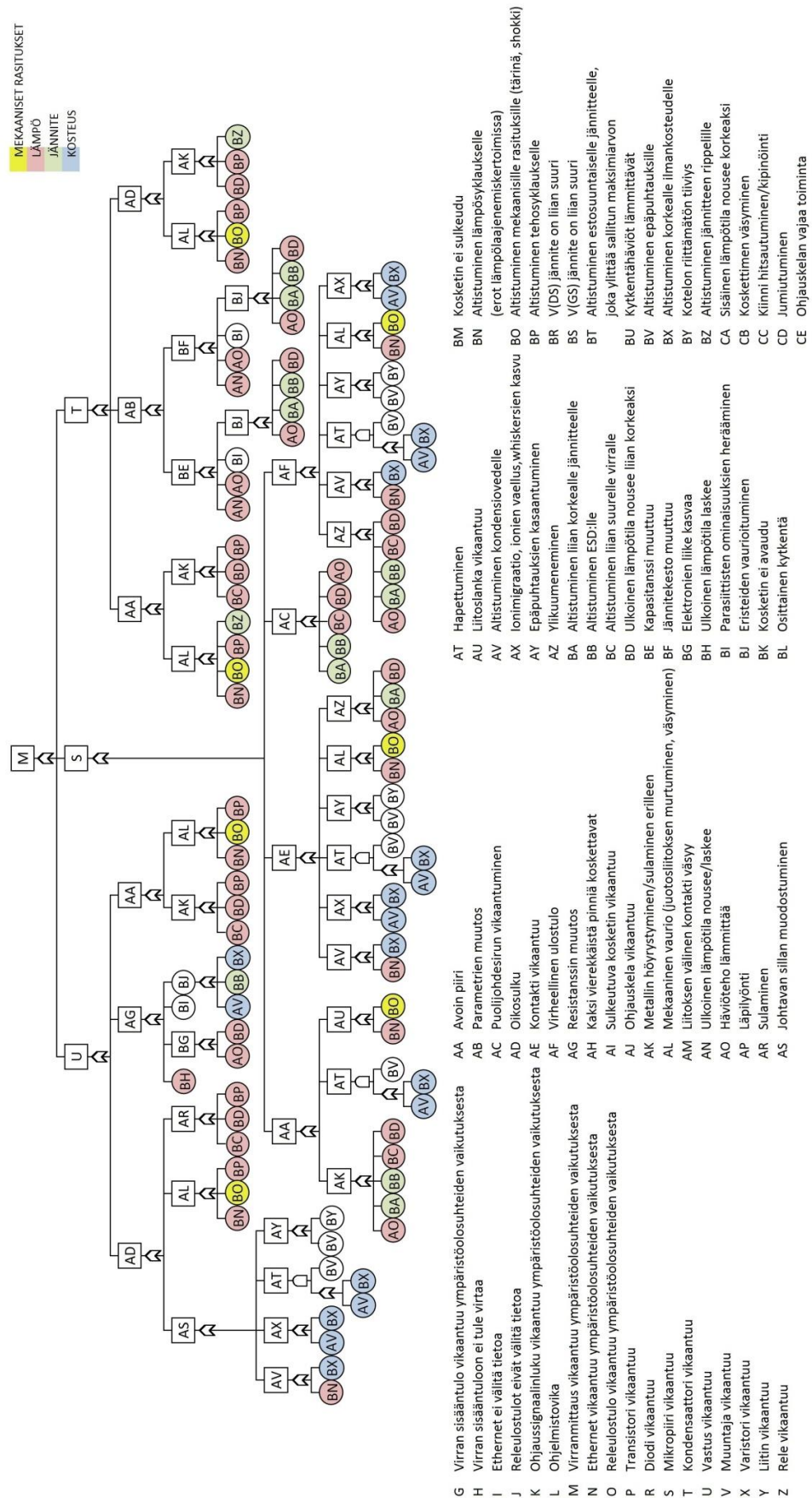
**Kuva 18.** KVL1: Vikapuu huipputapahtumalle "Virran sisääntulo vikaantuu ympäristöolosuhteiden vaikutuksesta"



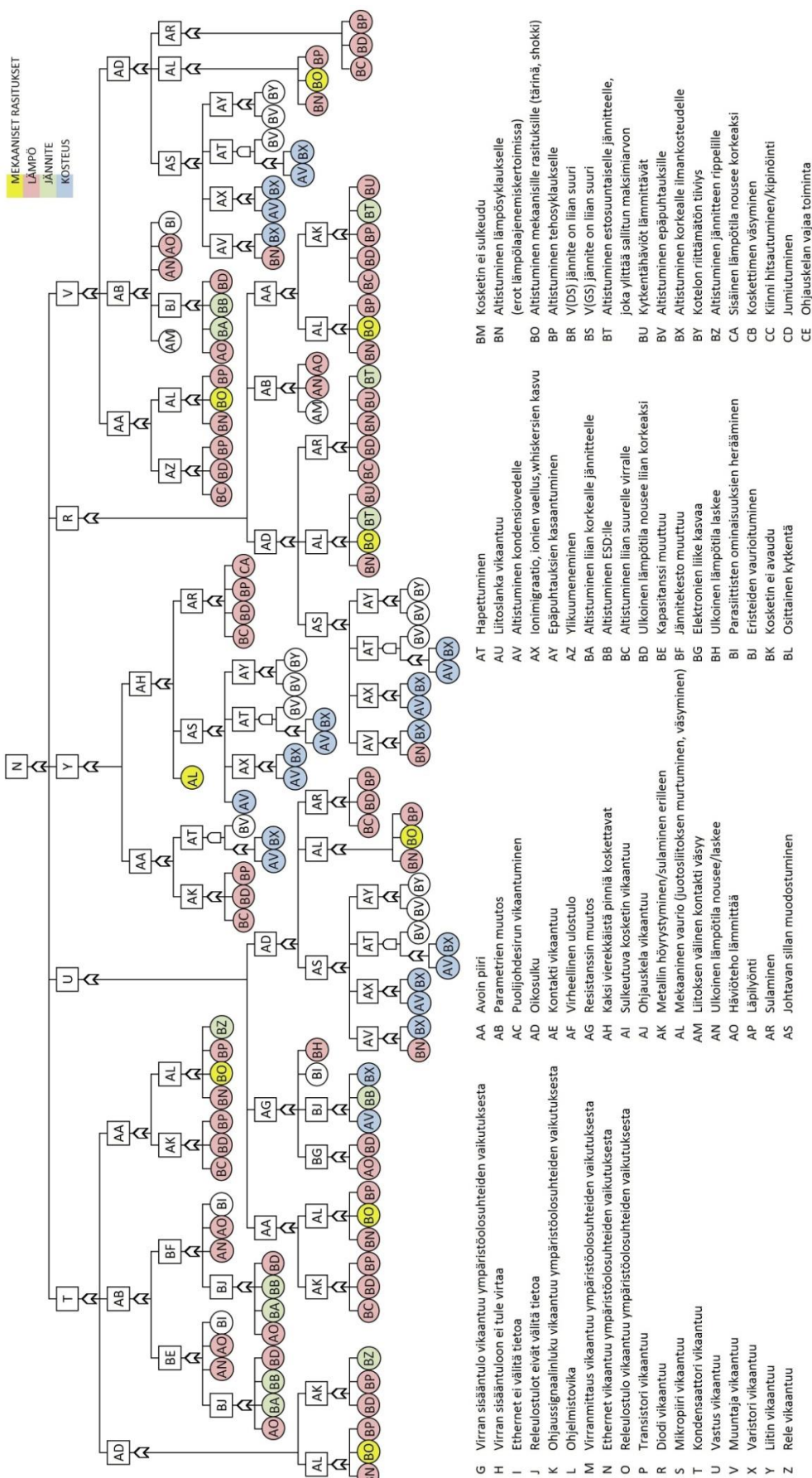


**Kuva 19.** KVL1: Vikapuu huipputapahtumalle "Ohjaussignaalinluku vikaantuu ympäristöolosuhteiden vaikutuksesta"

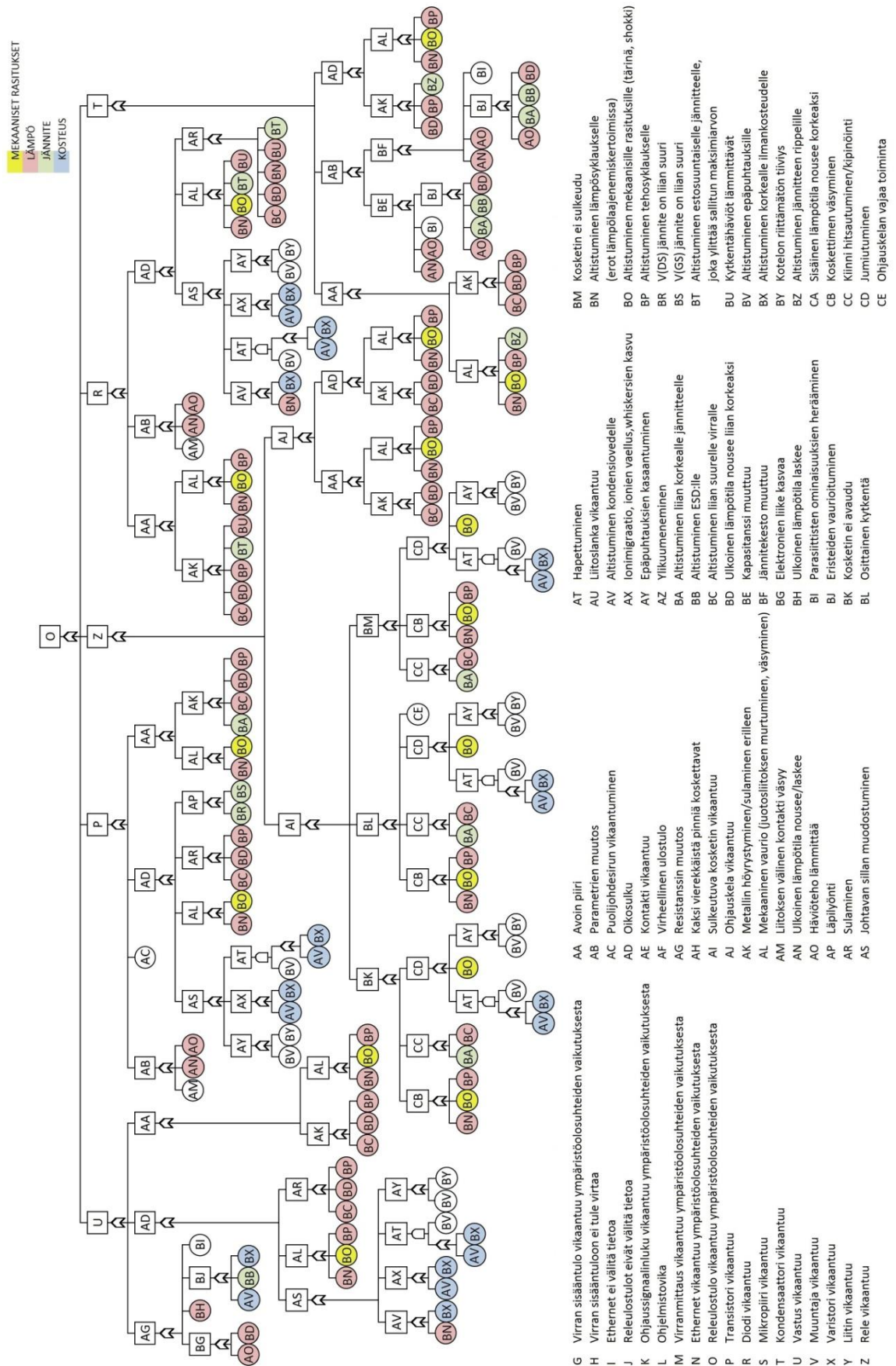




Kuva 20. KVL1: Vikapuu huipputapahtumalle "Virranmittaus vikaantuu ympäristöolosuhteiden vaikutuksesta"



**Kuva 21.** KVL1: Vikapuu huipputapahtumalle ”Ethernet vikaantuu ympäristöolosuhteiden vaikutuksesta”



**Kuva 22.** KVL1: Vikapuu huipputapahtumalle ”Releulostulo vikaantuu ympäristöolosuhteiden vaikutuksesta”

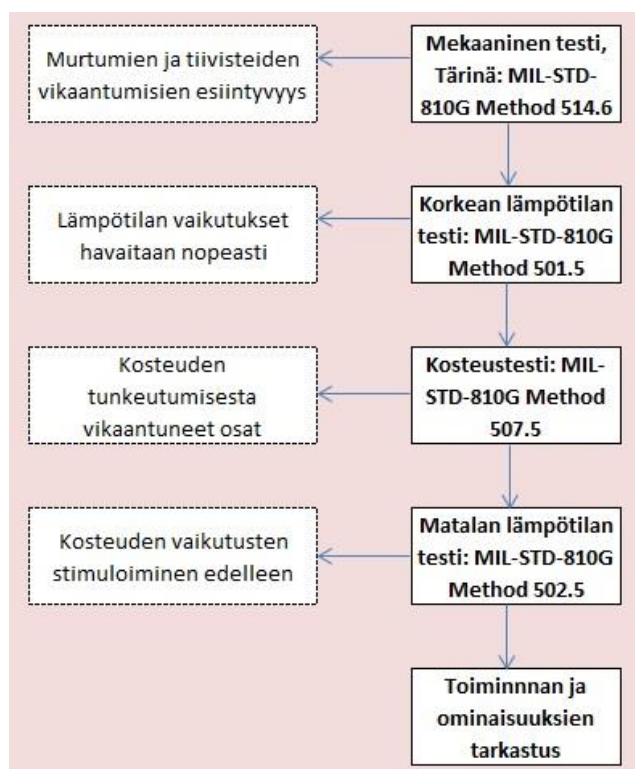




teen tärinän ja shokin kesto ovat kiinnostuksen kohteena, sillä laite altistuu niille jatkuvasti. Kosteuden vaikutusta sähkökomponenttien vikaantumiseen vähätellään usein. Tämä johtuu osittain varmasti myös siitä, että kosteuden aiheuttama elektroniikkakomponentin vikaantuminen on vaikeammin havaittavissa kuin mekaanisen komponentin, jolloin vikaantumisen syy voi jäädä kokonaan selvittämättä tai se voidaan analysoida väärin. Ympäristöolosuhdematriisista nähdään, että kaikilla näillä rasitusolosuhteilla on myös keskinäisiä vaikutuksia. Suunnittelutietojen perusteella KVL1:n eliniän voidaan olettaa olevan riittävä sille määritellyssä käyttöympäristössä. Näin ollen testaus haluttiin keskittää vikaantumiseen tähtäävään testaukseen, joka selvittää suorituskyvyn poikkeustilanteissa. Testin tavoitteiksi asetettiin:

1. Selvittää olosuhteet, joissa KVL1 vikaantuu?
2. Selvittää komponentit, jotka ovat luotettavuuden kannalta heikoimpia?

KVL1:n testisuunnitelma koostuu testisarjasta, joka on esitetty kuvassa 23.



**Kuva 23.** KVL1:n vikaantumiseen tähtäävä testisarja

Testinäytteenä on KVL1 kokonaisuudessaan. Testisarjan ensimmäisenä testinä on tärinätesti MIL-STD-810G Method 514.6 mukaisesti. Tarkoituksena on tuoda esille mahdolliset heikot liitokset ja murtumakohdat. Murtumia lähdetään kasvattamaan edelleen korkean lämpötilan testin avulla, joka tässä tapauksessa on MIL-STD-810G Method 501.5 Procedure II mukainen syklinen lämpötesti. KVL1 on testin ajan toiminnassa ja sen toimintaa seurataan ulkoisilla antureilla. Testin tavoitteena on selvittää, miten korkeat

lämpötilat vaikuttavat laitteen materiaalien suorituskyykyyn sen ollessa toiminnassa. Testisarja etenee seuraavaksi kosteustestiin. Kosteustesti on MIL-STD-810G Method 502.5 Procedure II mukainen. Sen avulla testataan laitteen kestoa lämpimälle ja kostealle ilmas-  
tolle sekä pyritään tuomaan esille potentiaaliset kosteuden aiheuttamat ongelmat. Testi mahdollistaa kosteuden tunkeutumisen jo vioittuneisiin osiin. Kosteuden aiheuttamaa vi-  
kaantumista korostetaan tämän jälkeen matalan lämpötilan testillä, joka on MIL-STD-  
810G Method 502.5 mukainen. Viimeisenä vaiheena on toiminnan ja ominaisuuksien tar-  
kastus, jossa analysoidaan laitteen kunto ja tehdään tarvittavat toimenpiteet. Testisarjaa  
käytettäessä on tärkeää, että jokainen testilaitte testataan samalla tavalla ja testit suori-  
taan samassa järjestyksessä.

KVL1:n tapaus osoittaa, että vikapuu kasvaa helposti hyvin laajaksi, vaikka analysointi-  
menetelmäksi pyrittiin valitsemaan parhaiten kompleksille systeemille soveltuva mene-  
telmä. Huipputapahtumaksi valittiin kunnonvalvontalaitteen vikaantuminen ympäristö-  
olosuhteiden vaikutuksesta, joka on suhteellisen laaja käsite. Vikapuuta olisi voitu kaven-  
taa valitsemalla tarkempi kuvaus huipputapahtumalle. Käytännössä tämä olisi täytynyt  
toteuttaa useammalla tarkemman huipputapahtuman vikapuulla, sillä ympäristö-  
rasitusten vaikutukset haluttiin joka tapauksessa tarkastella kokonaisvaltaisesti. Tarkemman vika-  
puun toteuttaminen olisi ollut perusteltua, jos eri tapahtumien todennäköisyydet olisivat  
olleet tunnettuja tai selvitettävissä. Tällöin vikapuu olisi mahdollistanut eri vikaantumis-  
ketjujen kriittisyyden keskinäisen vertailun ja luotettavuuden määrällisen arvioinnin.  
KVL1 tapauksessa todennäköisyydestä ei kuitenkaan ollut saatavilla, joten vikapuu  
toimi ainoastaan laadullisen tiedon lähteenä.

Vikapuuanalyysin tuloksia ja sen perusteella laadittua testisarjaa voidaan jossain määrin  
yleistää pätemään myös muille sähkölaitteille. KVL1 koostuu täysin perussähkökom-  
ponenteista (kuten vastukset, kondensaattorit, releet, mikropiirit, varistorit, transistorit,  
muuntajat, kytkimet ja liittimet), joista myös monet muut sähkölaitteet koostuvat. Karke-  
alla tasolla on mahdollista olettaa, että myös näiden vikaantumisten taustalla eniten vai-  
kuttavat ympäristö-  
rasitukset ovat lämmöstä, jännitteestä, kosteudesta ja mekaanisesta ra-  
situksesta johtuvia. Sähkölaitteiden vikaantumisen juurisyy on harvoin selvitettävissä.  
Vikaantunut komponentti usein löydetään, mutta syy vikaantumisen takana on huomatta-  
vasti vaikeammin määritettävissä. Sähkölaitteille ja -komponenteille analysointimenetel-  
mät toimivat parhaiten taustatiedon kartoittamisen ja testisuunnitelman tukena eikä ne  
näin ollen voi korvata testausta täysin luotettavuuden varmistamisessa.

## 5.2.2 Kunnonvalvontalaite 2

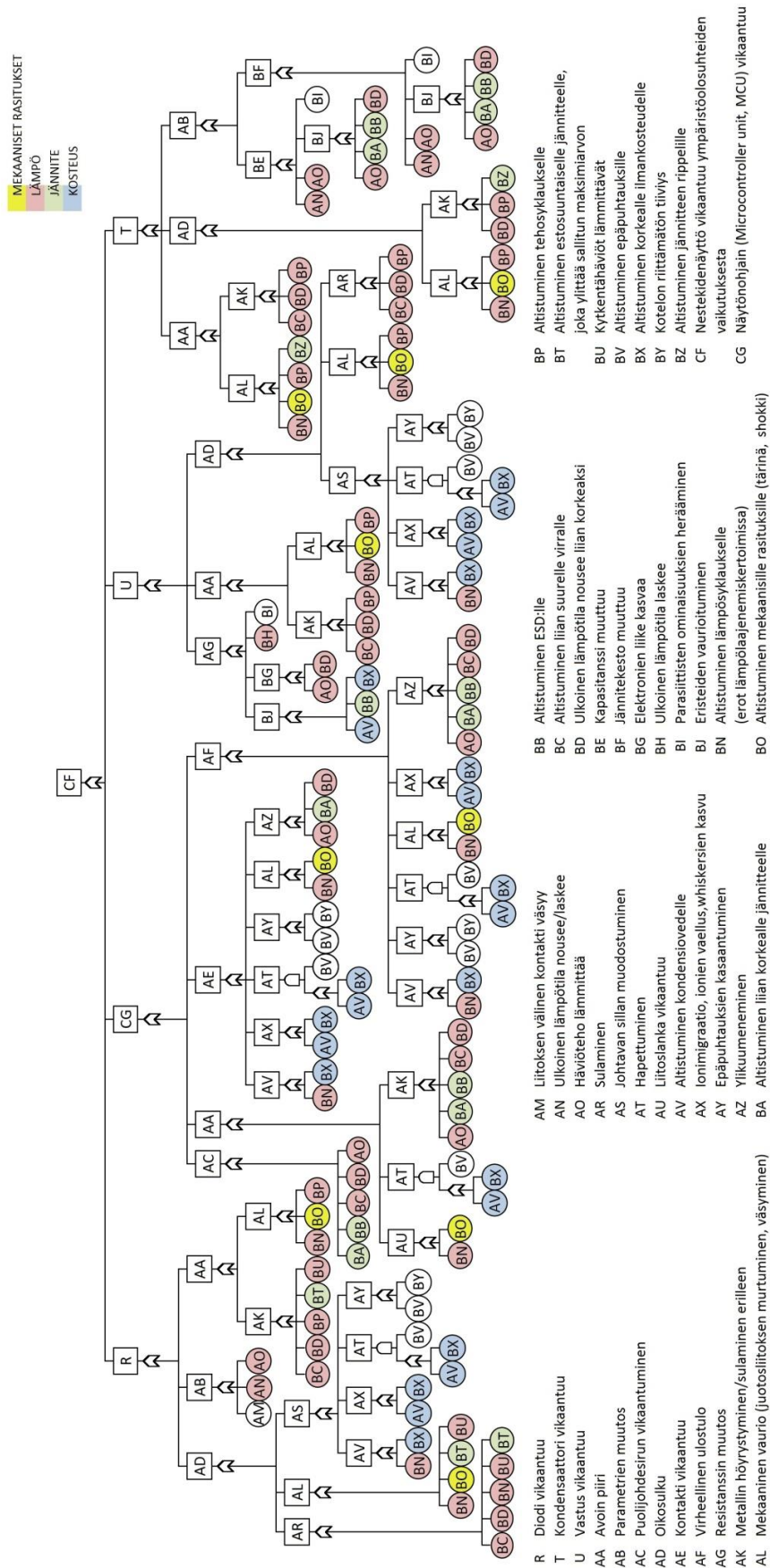
Toisena sähkölaite-esimerkkinä käsiteltiin kunnonvalvontalaite 2, KVL2. Laite kerää pe-  
rustietoja nostimen käytöstä. Se on turvallisuuskriittinen komponentti, jonka tehtävänä  
on estää nosturin ylikuormitus. Sen toiminta perustuu venymäliuska-  
tekniikkaan. Veny-  
mäliuska-anturi on itse laitteen ulkopuolella nostovaunussa. Laitteessa on ohjelmoitava  
rele, joka saa valon vilkkumaan tai hälytysäänen soimaan ylikuormaustilanteessa. Myös

KVL2 on vielä kehitysasteella, joten sen valmistus-, varastointi- ja kuljetusolosuhteet ovat tuntemattomat. Tarkastelu painotetaan siis käyttöolosuhteiden vaikutuksiin samoin kuin KVL1:n kohdalla.

KVL1:llä ja KVL2:lla on hyvin paljon yhteistä. Käyttöympäristöt ovat vastaavat, sillä myös KVL2 sijaitsee sähkökaapissa, joka on tarvittaessa ilmastoitu. Tosin KVL2 on vaunun sähkökaapin sijaan tyypillisesti sillan sähkökaapissa. Tämä vaikuttaa luonnollisesti laitteen kokemaan värinän määrään, joka tässä tapauksessa on pääosin sillan liikkeistä johtuvaa. KVL2:n käyttö- ja varastointiympäristön minimi- ja maksimilämpötilat vastaavat KVL1:n ääriarvoja. KVL2:n muovikotelon kotelointiluokka (IP20) on myös sama kuin KVL1:llä. Samoin sillan sähkökaapin kotelointiluokka (IP65) vastaa vaunun sähkökaapin kotelointiluokkaa. Kuten aikaisemmin todettiin IP20 estää 12,5 mm vieraiden esineiden sisäänkäynnin, mutta ei suojaa laitetta kosteudelta. Kotelointiluokka IP65 vastaa pölytiivistä sekä vesisuihkulta suojaavaa koteloa. KVL2:n tavoite-elinikä on kymmenen vuotta.

KVL1:lle suoritettu vikapuuanalyysi tehtiin komponenttinäkökulmasta ottamatta kantaa niiden sijoitteluun piirilevyllä tai komponenttien keskinäisiin vaikutuksiin. Vikapuulla ei määritetty luotettavuusarvoja KVL1:lle, vaan sen avulla kartoitettiin eri komponenttien vikaantumiseen johtavia merkittävimpiä ympäristön rasitustekijöitä. Tästä syystä vikapuun tuloksia rasitustekijöistä voidaan karkealla tasolla yleistää pätemään myös muille samantyyppisistä komponenteista koostuviin sähkölaitteisiin, joiden rasitusolosuhteet ovat samat. KVL2 koostuu pääosin samoista sähkötekniikan peruskomponenteista kuin KVL1. Näin ollen on perusteltua olettaa, että vikaantumiseen eniten vaikuttavat ympäristörasitustekijät ovat todennäköisesti myös lämpötila, kosteus, jännite ja mekaaniset rasitukset. Vikaantumiseen johtavan rasituksen suuruus tai altistuksen kesto sen sijaan voi vaihdella.

Rakenteiden suurimpana eroavaisuutena on KVL2:ssa oleva nestekidenäyttö (*Liquid crystal display, LCD*). Tästä syystä näytön vikaantuminen olosuhteenäkökulmasta käsiteltiin erikseen. Vikapuun on esitetty kuvassa 24. Vikapuun tapahtumien nimeäminen on yhtenäinen KVL1:n vikapuiden kanssa, mikä mahdollistaa kuvien vertailun. Kuvasta nähdään, että näytön vikaantumiseen vaikuttavat samat ympäristön rasitustekijät kuin KVL1:n kohdalla. Tämän perusteella voidaan todeta, että KVL1:lle laadittu testisarja on soveltavissa myös KVL2:lle.



Kuva 24. KVL2: Vikapuu huipputapahtumalle "Nestekidenäyttö vikaantuu ympäristöolosuhteiden vaikutuksesta"



## 6 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli selvittää nosturin luotettavuuteen ja sitä kautta vikaantumiseen eniten vaikuttavat ympäristörasitukset. Lisäksi haluttiin selvittää, mitä luotettavuuden varmistusprosessi olosuhdenäkökulmasta sisältää. Kiinnostuksen kohteena oli erityisesti sähkökomponenttien luotettavuuden varmistus, sillä nosturin mekaanisten rakenteiden vikaantuminen tunnetaan jo hyvin.

Vikaantumisen todennäköisyys kasvaa laitteen vanhetessa. Yhdellä tai useammalla tuotteen vikamuodolla voi olla kasvava hetkellinen vikataajuus ja tällöin luotettavuuden varmistuksessa tulee keskittyä nimenomaan riittävän luotettavuuden ylläpitoon odotetulla eliniällä. Luotettavuuden varmistaminen olosuhdenäkökulmasta vaatii olosuhdetekijöiden aikariippuvuuden huomioimisen. Hetkellinen altistus tietylle rasitustekijälle ei välttämättä vielä kerro mitään saman rasituksen pitkäaikaisista vaikutuksista.

Testauksessa tämä tarkoittaa käytännössä, että testin tulee olla joko hyvin pitkä tai kiihdytetty sille sopivalla tavalla, jotta on mahdollista saada tietoa luotettavuudesta, vikamuodoista tai eliniästä. Usein aikataulu- ja kustannusrajoitteet pakottavat kiihdytettyihin testeihin. Valitettavasti analysointimenetelmäkään eivät tarjoa oikopolkua luotettavuuden varmistamiseen. Analysointimenetelmät soveltuvat huonosti ajasta riippuvan laitteen luotettavuuden määrälliseen analysointiin. Tämä on luonnollisesti keskeinen puute, kun halutaan tarkastella nimenomaan ympäristöolosuhteiden vaikutuksia laitteeseen tai sen osakokoonpanoihin. Analysointimenetelmien avulla voidaan kuitenkin selvittää vikaantumisen kannalta olennaisia tekijöitä ja kehittää rakennetta edelleen tai vastaavasti keskittää testaus oikeisiin asioihin. Analysointimenetelmien avulla voidaan myös tunnistaa vikaantumisen kannalta kriittisiä tapahtumaketjuja, jos eri tapahtumien todennäköisyydet ovat tunnettuja. Tämä edesauttaa edelleen testauksen tehokkuutta.

Sovelluksesta riippuen voidaan päätyä joko pelkkään analysointimenetelmien tai testauksen hyödyntämiseen. Paras mahdollinen tapa on kuitenkin käyttää näitä tukemaan toisiaan. Molempien hyödyntämisessä nosturisovelluksille on omat rajoitteensa. Testauksessa haasteena ovat näytteiden vähäinen määrä ja suuri fyysinen koko. Analysointimenetelmien tapauksessa taas rajoitteena ovat puutteelliset tiedot eri vikamekanismien todennäköisyyksistä ja muista tarvittavista tiedoista.

Kirjallisuustutkimuksen perusteella laadittiin luotettavuuden varmistusprosessi. Luotettavuuden varmistusprosessi muodostuu useasta eri vaiheesta. Näistä ensimmäinen on taustatutkimus, jossa tehtävänä on selvittää kaikki mahdollinen tieto laitteen materiaaleista, rakenteesta, olosuhteista eri käyttöympäristöissä ja käytöstä aiheutuvista rasituksista. Toisessa vaiheessa asetetaan tavoitteet luotettavuuden varmistusprosessille ja valitaan tarkastelunäkökulma. Tämän jälkeen edetään luotettavuuden laadulliseen arviointiin

ja tästä mahdollisesti myös sen määrälliseen arviointiin. Näiden tietojen avulla laaditaan testisuunnitelma ja aloitetaan testaus. Lopuksi vedetään yhteen analysointimenetelmien ja testauksen avulla esille saadut tulokset ja pyritään tunnistamaan potentiaaliset ongelmakohdat. Yhteenvedon perusteella todetaan joko luotettavuuden olevan riittävällä tasolla tai valitaan ja toimeenpannaan tarvittavat jatkotoimenpiteet luotettavuuden parantamiseksi.

Kirjallisuustutkimus ja tulokset osoittavat, että erityisesti sähkölaitteiden kohdalla luotettavuuden analysointimenetelmät toimivat parhaiten testisuunnitelman laatimisen tukena. Tähän vaikuttaa sähkölaitteiden vikaantumisen luonne, joka poikkeaa mekaanisista rakenteista arvaamattomuutensa ja vikaantumisen juurisyyn vaikean analysoitavuuden perusteella. Analysointimenetelmiä ei siis tulisi käyttää sähkölaitteiden testauksen korvauksena muuta kuin tilanteissa, joissa eri vikaantumistapahtumien todennäköisyydet tunnetaan tarkasti.

Olosuhdetestaussuunnitelma tulisi laatia huolella laitteen taustatietojen ja analysointimenetelmän tulosten perusteella. Huolella laadittu olosuhdetestaus mahdollistaa testauksen olennaisten rasitusten kannalta oikealla tavalla ja oikeassa järjestyksessä. Testattava laite voi olla testin aikana levossa tai käytössä. Näistä jälkimmäinen antaa todellisempia tuloksia, sillä usein laitteen toiminta tuottaa myös lämpöä. Tällöin ympäristön rasitusten sekä laitteen itse tuottamien rasitusten summa on se, jolla on merkitystä. Testaus voidaan tyypillisesti tehdä pito-, syklaus- tai shokkitestinä. Testien pituus riippuu testin rasittavuudesta ja komponentin kestävyyydestä. Testin luotettavuus on sitä parempi mitä useampi komponentti on testattu vikaantumiseen asti. Harvoin on silti mahdollista testata kaikkia rasitusolosuhteita tai näiden yhdistelmiä.

Tässä työssä sovellettiin vikapuuanalyysiä kahdelle kunnonvalvontalaitteelle: KVL1:lle ja KVL2:lle. Vikapuista kävi ilmi, että merkittävimmät ympäristörasitukset voidaan jakaa neljään: lämpöön, jännitteeseen, kosteuteen ja mekaanisiin rasituksiin. Jännite yhdessä kosteuden kanssa edesauttaa korroosion vaikutuksia. Mekaanisista rasituksista puolestaan merkittävin on värinä. Kunnonvalvontalaitteiden (KVL1 ja KVL2) vikaantumista tarkasteltiin pelkästään komponenttinäkökulmasta. Todellisuudessa komponenttien keskinäisillä vaikutuksilla, niiden sijoittelulla ja mallilla on myös vaikutuksensa vikaantumiseen. Komponenttinäkökulma mahdollistaa kuitenkin tulosten karkean yleistämisen myös muihin vastaavista komponenteista koostuviin laitteisiin, jotka altistuvat samoille olosuhdetekijöille. Vikaantuminen voi yhdellä komponentilla tietyssä laitteessa tapahtua jollain tietyllä ajan hetkellä, kun taas toinen vastaava komponentti jossain toisessa laitteessa voi toimia vikaantumatta vielä pitkänkin aikaa tämän jälkeen. Jos kuitenkin molemmat vikaantuvat jollain ajan hetkellä, on todennäköistä, että vikaantumiseen johtanut syy on joko lämmöstä, jännitteestä, kosteudesta tai mekaanisesta rasituksesta johtuvaa. Tulosten perusteella voidaan todeta, että vastaavissa olosuhteissa KVL1:n, KVL2:n tai muun näihin verrattavissa olevan sähkölaitteen vikaantumisen taustalla on suurella todennäköisyydellä jokin näistä neljästä rasitustekijästä.

Lämpötila on yksi merkittävimmistä elektroniikkakomponenttien ja -laitteiden vaurioon johtavista ympäristöllisistä rasitustekijöistä. Lämpötilalla on elektroniikkakomponenttien eliniän lisäksi suuri merkitys mekaanisten komponenttien korroosionopeuteen. Lämpötilan nosto onkin usein käytetty tapa kiihdyttää elinikätestiä. Korkeaa lämpötilaa hyödynnetään usein myös screening -testauksessa (burn-in). Lämpötilan testauksessa olennaisimpia asioita ovat lämpötilan ääriarvot ja lämpötilan muutosnopeus.

Kuten lämpötila myös kosteus voi kiihdyttää tai aiheuttaa vikaantumista. Kosteus kuuluu lämpötilan lisäksi tärkeimpiin ilmastollisiin tekijöihin, jotka aiheuttavat vikaantumista. Vikaantumisen kiihtyminen voi tapahtua esimerkiksi korroosion, veden imeytymisen tai homeen kasvun kautta. Kosteuden määrä on kääntäen verrannollinen lämpötilaan, kunnes kastepiste on saavutettu, jonka jälkeen vesi alkaa kondensoitua pinnoille. Kosteus vaikuttaa metallikomponentteihin korroosionopeuden sekä muovikomponentteihin veden imeytymisen kautta. Kosteustesteissä komponentti altistetaan tyypillisesti korkealle ilmankosteudelle. Tavallisesti kosteustestille on määritetty myös tarkka lämpötila. Yleisesti ottaen kosteustestit ovat aina lämpötilan ja kosteuden yhdistelmätestausta.

Korroosiota esiintyy niin mekaanisissa kuin sähköisissä komponenteissa, sillä molemmissa on tyypillisesti metallisia osia. Tyypillisesti komponenttien tai laitteiden korroosionkestoa testataan suolasumutestein. Korroosiotestit ovat kiihdytettyjä testejä, joissa näyte altistetaan todellisia käyttöolosuhteita rankemmille olosuhteille. Testiä voidaan kiihdyttää lisäksi luomalla jonkinlainen alkusysäys (kuten naarmu korroosionsuojapinnoitteeseen) vikaantumiselle. Korroosiotestaus soveltuu parhaiten ongelmakohtien, kuten pinnoitteen epäjatkuvuuskohtien tai suunnitteluvirheiden, etsimiseen. Vastaavasti sitä voidaan käyttää myös eri pinnoitteiden tai muiden ominaisuuksien vertailuun. Elinikätestaukseen ne eivät sovellu, sillä testin olosuhteet eivät tavallisesti vastaa käyttöolosuhteita.

Vikaantuminen voi johtua myös mekaanisista rasituksista, jota testataan dynaamisen olosuhdetestauksen avulla. Dynaaminen olosuhdetestaus mekaanisilla komponenteilla käsittelee pääasiassa erilaiset elinikä-, iskutkeys-, väsymis- ja kulumistestit. Sähkökomponenttien dynaamisessa olosuhdetestauksessa testataan tyypillisesti komponentin kykyä sietää kiihtyvyyttä, iskuja ja tärinää. Tämän lisäksi voidaan testata niiden kykyä sietää ulkoisia jännitepiikkejä tai eri komponenttien sähkömagneettisesta yhteensopimattomuudesta riippuvia tekijöitä.

Todellisessa käyttöympäristössä vaikuttaa harvoin vain yksi rasitustekijä kerrallaan. Olosuhdetestauksessa yhdistelmätestaus on yleistä, sillä se säästää aikaa ja antaa lisäksi käytännönläheisempiä tuloksia. Yhdistelmätestauksessa yhdistetään kaksi tai useampi rasitustekijä. Näin koko testin kiihdytyskerroin saadaan kymmen- tai jopa satakertaiseksi. Rasitustekijöiden yhdistäminen ei pelkästään nopeuta testiä vaan voi tuoda esille myös aivan uusia vikamekanismeja. Testejä toteutetaan laajasti eri sähkökomponenteille, mutta niitä voidaan yhtä hyvin soveltaa muillekin komponenteille. Vaihtoehtoisesti yhdistel-

mätestaus voidaan suorittaa myös sarjana erillisiä ympäristörasituskokeita. Testisarja laaditaan niin, että sen rasitusolosuhteet noudattelevat laitteen tai komponentin todellisia rasitusolosuhteita edeten vähiten rasittavista pysyviä vahinkoja aiheuttaviin testeihin. Jos testattavia näytteitä on enemmän kuin yksi, on tärkeää, että kaikkien näytteiden testisarja on järjestykseltään sama, jolloin näytteiden vertailtavuus säilyy. Menetelmää käytetään erityisesti silloin, kun testinäytteiden määrä on vähäinen, mutta niiden avulla halutaan saada mahdollisimman paljon tietoa laitteen tai komponentin vikaantumisen sen eri käyttöolosuhteissa.

Luotettavuuden varmistusprosessia voidaan soveltaa olosuhdetestausnäkökulmasta mille tahansa laitteelle tai komponentille. Kunnonvalvontalaitteiden vikapuiden tuloksia voidaan sen sijaan soveltaa vain karkealla tasolla muille vastaaville laitteille, jotka altistuvat samoille olosuhteille. Näidenkin osalta voidaan ainoastaan todeta, että vikaantumista aiheuttavat rasitukset ovat todennäköisesti samat.

Haasteellista luotettavuuden varmistamismenetelmien soveltamisessa ja testaussarjojen laatimisessa on esimerkkien vähäisyys. Luotettavuuden varmistamista tehdään yrityksissä koko ajan enemmän ja enemmän, mutta testimenetelmät ja niiden tulokset jätetään tyypillisesti vain sisäiseen käyttöön. On ymmärrettävää, ettei mahdollisia puutteita tuotteiden luotettavuudessa haluta tuoda julki.

Tutkimuksessa onnistuttiin löytämään kunnonvalvontalaitteiden vikaantumisen kannalta olennaiset rasitustekijät. Näiden perusteella laadittiin testisarjat, joita voidaan soveltaa myös vastaaville sähkölaitteille. Eri rasitustekijöiden testaus sarjana vaatii paljon aikaa. Testauksen haluttiin noudattavan olosuhdetestausstandardeja, mistä johtuen tämä on ainoa tapa toteuttaa testaus. On kuitenkin syytä pohtia, päästäänkö standardeja noudattamalla parhaaseen lopputulokseen. Yhdistelmätestaus, jossa näyte altistetaan eri rasitustekijöille samanaikaisesti, ei tuottaisi pelkästään ajallista säästöä vaan oikein toteutettuna myös paremmin todellisia käyttöolosuhteita vastaavat rasitusolosuhteet. Yhdistelmätestauksen toteuttaminen tällaisenaan vaatisi lisätutkimusta, jotta oikeiden rasitustekijöiden ja olosuhteiden valinta olisi mahdollista. Vastaavanlaisen tutkimuksen toteuttaminen nosturin mekaanisille komponenteille olisi myös aiheellista, jotta saataisiin selville niiden vikaantumisen takana olevat olosuhdetekijät.

## LÄHTEET

Ajit, S., Karanki, D. & Verma, A. 2010. Reliability and Safety Engineering. London, Springer. 535 p.

ASTM B117 1973. Standard method of salt spray (fog) testing. United States, American Society for Testing and Materials. 8 p.

ASTM D 570 1998. West Conshohocken United States, ASTM International. 4 p.

ASTM G85-11 2011. Standard Practice for Modified Salt Spray (Fog) Testing. United States, American Society for Testing and Materials. 14 p.

Birolini, A. 2010. Reliability Engineering: Theory and Practice. 6th ed. New York, Springer. 610 p.

Callister, W.D. & Rethwich, D.G. 2007. Materials Science and Engineering. 7th ed. United States, John Wiley & Sons, Inc. 721 p.

China Mine Cranes Co.Ltd: Products [WWW] [viitattu 14.2.2014]. Saatavissa: <http://www.china360crane.com/Products.Asp?SortID=57>.

Cramer, S. 2006. Introduction to Corrosion in Specific Environments. In: Anonymous (ed.). Corrosion: Environments and Industries. ASM International. pp. 5-7.

Cristaldi, L., Lazzaroni, M., Peretto, L. & Rinaldi, P. 2011. Reliability Engineering: Basic Concepts and Applications in ICT. Springer. 161 p.

Donofrio, J. 2000. Zinc Phosphating. Metal Finishing [verkkolehti]. 98, 6, pp. 57-58, 60-73 [viitattu 20.3.2014]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002605760080392X>.

Duvall, D.E. 2002. Effect of Environment on the Performance of Plastics. In: Anonymous (ed.). Failure Analysis and prevention. 11th ed. ASM International. pp. 796-799.

Espec Technology Report No. 1 [WWW]. Tabai Espec Corporation. 1996 [viitattu 13.5.2014]. Saatavissa: [http://www.espec.co.jp/english/tech-info/tech\\_info/index.html](http://www.espec.co.jp/english/tech-info/tech_info/index.html).

Espec Technology Report: No. 10 [WWW]. Tabai Espec Corporation. 2000 [viitattu 9.3.2014]. Saatavissa: [http://www.espec.co.jp/english/tech-info/tech\\_info/index.html](http://www.espec.co.jp/english/tech-info/tech_info/index.html).

Espec Technology Report: No. 2 [WWW]. Tabai Espec Corporation. 1996 [viitattu 15.3.2014]. Saatavissa: [http://www.espec.co.jp/english/tech-info/tech\\_info/index.html](http://www.espec.co.jp/english/tech-info/tech_info/index.html).

Espec Technology Report: No. 3 [WWW]. Tabai Espec Corporation. 1997 [viitattu 17.3.2014]. Saatavissa: [http://www.espec.co.jp/english/tech-info/tech\\_info/index.html](http://www.espec.co.jp/english/tech-info/tech_info/index.html).

Espec Technology Report: No. 4 [WWW]. Tabai Espec Corporation. 1997 [viitattu 17.3.2014]. Saatavissa: [http://www.espec.co.jp/english/tech-info/tech\\_info/index.html](http://www.espec.co.jp/english/tech-info/tech_info/index.html).

FEM 9.511 1998. Rules for the Design of Serial Lifting Equipment; Classification mechanisms. Germany, F.E.M. 5 p.

FEM 9.852 1998. Power driven series hoist mechanisms; Standardised test procedure for verification of the classification. Germany, F.E.M. 11 p.

Finnlift Materiaalinkäsittely Oy: Mikä nosturi sopii meille [WWW] [viitattu 18.2.2014]. Saatavissa: <http://www.finnlift.fi/mika+nosturi+sopii+meille/>.

Fisher, J. & Van de Pas, J. 2002. New Fatigue Provisions for the Design of Crane Runway Girders. Engineering Journal Second quarter, pp. 65-73.

Flink, R., Killström, T., Kilpinen, J., Kotilainen, P. & Tuisku, L. Metallipintojen teollinen maalaus [WWW]. Tikkurila Oy, Industrial Coatings [viitattu 20.3.2014]. Saatavissa: [http://www.tikkurila.fi/files/5017/Metallipintojen\\_teollinen\\_maalaus\\_2009.pdf](http://www.tikkurila.fi/files/5017/Metallipintojen_teollinen_maalaus_2009.pdf).

Griffin, R.B. 2006. Corrosion in Marine Atmospheres. In: Anonymous (ed.). ASM Handbook. Texas, ASM International. pp. 42-60.

Hienonen, R. & Lahtinen, R. 2007. Korroosio ja ilmastolliset vaikutukset elektronikassa. Espoo, VTT. 243 p.

Höök, T., Meskanen, S., Orkas, J. & Tennilä, P. Suunnittelijan perusopas [WWW]. ValuAtlas. 15.12.2009 [viitattu 19.3.2014]. Saatavissa: <http://www.valuatlas.fi/tietomat/koosteet/valukappaleensuunnittelu/index.html>.

IEC 60068-2-11 1981. Basic environmental testing procedures – Part 2-11: Tests – Salt mist. International Electrotechnical Commission. 11 p.

IEC 60068-2-52 1996. Basic environmental testing procedures – Part 2-11: Tests – Salt mist, cyclic. International Electrotechnical Commission. 21 p.

IEC 60721-1 1990. Classification of environmental conditions - Part 1: Environmental parameters and their severities. International Electrotechnical Commission. 41 p.

IEC 61163-1 2006. Reliability stress screening - Part 1: Repairable assemblies manufactured in lots. International Electrotechnical Commission. 161 p.

IEC 62506 2013. Methods for product accelerated testing. International Electrotechnical Commission. 184 p.

ISO 12482 2014. Cranes - Monitoring for crane design working period. Switzerland, International Organization for Standardization. 14 p.

ISO 22986 2007. Cranes - Stiffness - Bridge and gantry cranes. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto. 7 p.

ISO 4301-1 1986. Cranes and lifting appliances - Classification - Part 1: General. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto. 4 p.

ISO 4306-1 2007. Cranes - Vocabulary - Part 1: General. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto. 98 p.

ISO 9223 2012. Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Classification, determination and estimation. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto. 15 p.

JESD22-A100D 2013. Cycled temperature humidity bias life test. Arlington, Virginia, JEDEC Solid State Technology Association. 8 p.

JESD22-A101C 2009. Steady-state temperature humidity bias life test. Arlington, Virginia, JEDEC Solid State Technology Association. 7 p.

JESD22-A103D 2010. High temperature storage life. Arlington, Virginia, JEDEC Solid State Technology Association. 6 p.

JESD22-A104D 2009. Temperature cycling. Arlington, Virginia, JEDEC Solid State Technology Association. 14 p.

JESD22-A105C 2004. Power and temperature cycling. Arlington, Virginia, JEDEC Solid State Technology Association. 8 p.

JESD22-A106B 2004. Thermal shock. Arlington, Virginia, JEDEC Solid State Technology Association. 6 p.

JESD22-A107C 2013. Salt atmosphere. Arlington, Virginia, JEDEC Solid State Technology Association. 4 p.

JESD22-A115C 2010. Electrostatic discharge (ESD) sensitivity testing, Machine model (MM). Arlington, Virginia, JEDEC Solid State Technology Association. 10 p.

JESD22-A122 2007. Power cycling. Arlington, Virginia, JEDEC Solid State Technology Association. 12 p.

JESD22-B103B 2002. Vibration, variable frequency. Arlington, Virginia, JEDEC Solid State Technology Association. 10 p.

JESD22-B110B 2013. Mechanical shock - Component and subassembly. Arlington, Virginia, JEDEC Solid State Technology Association. 10 p.

JS-001-2012 2012. Electrostatic discharge sensitivity testing - Human body model (HBM) - Component level. ESDA & JEDEC. 42 p.

Korroosiokäsikirja. 2004. 2nd ed. Rajamäki, Kunnossapitoyhdistys ry. 930 p.

Lehtonen, J. & Parikka, R. Kulumismekanismit ja niiden merkitys vierintälaakerien eliniälle [WWW]. Tekes. Espoo. 2000 [viitattu 11.4.2014]. Saatavissa: <http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/prognos/prognos/pdf/kulumismekf.pdf>.

Lindroos, V., Miekk-oja, H., Sulonen, M. & Veistinen, M. 1986. Uudistettu Miekk-ojan metallioppi. 2nd ed. Helsinki, Kustannusosakeyhtiö Otava. 841 p.

MIL-HDBK-2164A 1996. Environmental stress screening process for electronic equipment. United States, Department of Defense. 40 p.

MIL-HDBK-217F 1991. Reliability prediction of electronic equipment. United States, Department of Defence. 150 p.

MIL-HDBK-781A 1996. Reliability test methods, plans and environments for engineering, development qualification, and production. United States, Department of Defense. 392 p.

MIL-STD-202 2002. Electronic and electrical component parts. United States, Department of Defense. 186 p.

MIL-STD-750-1 2012. Environmental test methods for semiconductor devices part 1: Test methods 1000 through 1999. United States, Department of Defense. 160 p.

MIL-STD-750F 2012. Test methods for semiconductor devices. United States, Department of Defense. 15 p.

MIL-STD-781D 1986. Reliability testing for engineering development, qualification and production. United States, Department of Defense. 14 p.

MIL-STD-810G 2008. Environmental engineering considerations and laboratory tests. United States, Department of Defense. 795 p.

MIL-STD-883H 2010. Microcircuits. United States, Department of Defense. 722 p.

Nelson, W. 2004. Accelerated testing - Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis. 2nd ed. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc. 601 p.

O'Connor, P. & Kleyner, A. 2012. Practical Reliability Engineering. 5th ed. United Kingdom, John Wiley & Sons, Ltd. 484 p.



O'Connor, P. 2001. Practical Reliability Engineering. 3rd ed. England, John Wiley & Sons, Inc. 431 p.

PD-EC-1101 Environmental Factors [WWW]. NASA [viitattu 26.3.2014]. Saatavissa: <http://oce.jpl.nasa.gov/practices/1101.pdf>.

Polmear, I. 2005. Light Alloys. Butterworth Heinemann. 416 p.

Raaka-ainekäsikirja - Alumiinit. 2002. 13th ed. Helsinki, Metalliteollisuuden Keskusliitto MET. 235 p.

Raaka-ainekäsikirja - Muovit ja kumit. 2001. 2nd ed. Tampere, Metalliteollisuuden Keskusliitto MET. 172 p.

Reliability Information Analysis Center, RIAC Designing for Reliability [viitattu 17.7.2014]. Saatavissa: <http://www.theriac.org/DeskReference/viewDocument.php?id=282>.

ReliaSoft Corporation 2006. Reliability basics - Standards Based Reliability Prediction in a Nutshell [WWW]. Reliability HotWire [verkkolehti]. 70, [viitattu 8.7.2014]. Saatavissa: <http://www.weibull.com/hotwire/issue70/relbasics70.htm>.

RoyMech Risk - Safety assessments [viitattu 15.7.2014]. Saatavissa: [http://www.roy-mech.co.uk/Useful\\_Tables/ARM/Risk\\_Assessment.html](http://www.roy-mech.co.uk/Useful_Tables/ARM/Risk_Assessment.html).

Ruuviliitoksen suunnittelu [WWW]. Wurth Elektronik. Nurmijärvi. [viitattu 19.3.2014]. Saatavissa: <http://www.wurthelektronik.fi/site/media/pdf/we/kuvasto/suunnitte-luopas06.pdf>.

Sähkösinkitys ja sinkkinikkeli [WWW]. Elektropinta [viitattu 20.3.2014]. Saatavissa: <http://www.suomenelektropinta.fi/index.php?id=47>.

SFS-EN 60529+A1 2000. Sähkölaitteiden kotelointiluokat (IP-koodi). Helsinki, Suomen standardoimisliitto. 89 p.

SFS-EN ISO 12944 1998. Maalit ja lakat. Teräsrakenteiden korroosionesto suojamaaliyhdistelmillä. Helsinki, Suomen standardoimisliitto. 289 p.

SFS-EN ISO 16701 2008. Corrosion of metals and alloys. Corrosion in artificial atmosphere. Accelerated corrosion test involving exposure under controlled conditions of humidity cycling and intermittent spraying of a salt solution. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto. 13 p.

SFS-EN ISO 9227 2012. Corrosion tests in artificial atmospheres - Salt spray tests. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto. 19 p.

SFS-ISO 12482-1 1997. Nosturit. Kunnonvalvonta. Osa 1: Yleistä. Helsinki, Suomen standardoimisliitto. 13 p.

SFS-ISO 15243 2012. Rolling bearings. Damage and failures. Terms, characteristic and causes. Helsinki, Suomen standardoimisliitto. 41 p.

SRC, S.R.C. Environmental Effects on Mechanical Design [WWW]. Alion Science and Technology. 2001 [viitattu 26.3.2014]. Saatavissa: <http://src.alionscience.com/pdf/EnvironmentalEffectsonMechanicalDesign.pdf>.

Stahl - Wire rope hoists Product information [WWW]. Stahl Crane Systems GmbH. 13.3.2013 [viitattu 18.3.2014]. Saatavissa: [http://stahlcranes.com/\\_media/download/pdf/produkte/hebezeuge/seilzuege/pi\\_seilzug\\_de\\_en\\_fr\\_03\\_2013.pdf](http://stahlcranes.com/_media/download/pdf/produkte/hebezeuge/seilzuege/pi_seilzug_de_en_fr_03_2013.pdf).

Trivalent Chromates FAQ [WWW]. Electrochemical Products Inc. New Berlin, United States. [viitattu 20.3.2014].

Utilizing Advanced Statistical Reliability Methods to Improve Overall Asset Performance [WWW]. Reliabilityweb.com [viitattu 12.5.2014]. Saatavissa: [http://www.reliabilityweb.com/index.php/articles/utilizing\\_advanced\\_statistical\\_reliability\\_methods\\_to\\_improve\\_overall\\_asset/](http://www.reliabilityweb.com/index.php/articles/utilizing_advanced_statistical_reliability_methods_to_improve_overall_asset/).

VNp 22.12.1993/1403. Valtioneuvostonpätös työvälineiden turvallisesta käytöstä.

Zambrano, O., Coronado, J. & Rodríguez, S. 2014. Failure analysis of bridge a crane shaft. Case Studies in Engineering Failure Analysis 2, pp. 25-32.

## LIITE 1

### MIL-STD-810G olosuhdetestaustandardit

Test Method 500.5	Low Pressure (Altitude)
Test Method 501.5	High Temperature
Test Method 502.5	Low Temperature
Test Method 503.5	Temperature Shock
Test Method 504.1	Contamination by Fluids
Test Method 505.5	Solar Radiation (Sunshine)
Test Method 506.5	Rain
Test Method 507.5	Humidity
Test Method 508.6	Fungus
Test Method 509.5	Salt Fog
Test Method 510.5	Sand and Dust
Test Method 511.5	Explosive Atmosphere
Test Method 512.5	Immersion
Test Method 513.6	Acceleration
Test Method 514.6	Vibration
Test Method 515.6	Acoustic Noise
Test Method 516.6	Shock
Test Method 517.1	Pyroshock
Test Method 518.1	Acidic Atmosphere
Test Method 519.6	Gunfire Shock
Test Method 520.3	Temperature, Humidity, Vibration, and Altitude
Test Method 521.3	Icing/Freezing Rain
Test Method 522.1	Ballistic Shock
Test Method 523.3	Vibro-Acoustic/Temperature
Test Method 524	Freeze / Thaw
Test Method 525	Time Waveform Replication
Test Method 526	Rail Impact
Test Method 527	Multi-Exciter
Test Method 528	Mechanical Vibrations of Shipboard Equipment (Type I – Environmental and Type II – Internally Excited)
Test Method 526	Rail Impact
Test Method 527	Multi-Exciter
Test Method 528	Mechanical Vibrations of Shipboard Equipment (Type I – Environmental and Type II – Internally Excited)

## LIITE 2

### JEDEC olosuhdetestausstandardit

JESD22-A100D	CYCLED TEMPERATURE HUMIDITY BIAS LIFE TEST
JESD22-A115C	ELECTROSTATIC DISCHARGE (ESD) SENSITIVITY TESTING MACHINE MODEL (MM)
JESD22-A108D	TEMPERATURE, BIAS, AND OPERATING LIFE
JESD22-A104D	TEMPERATURE CYCLING
JESD22-A113F	PRECONDITIONING OF PLASTIC SURFACE MOUNT DEVICES PRIOR TO RELIABILITY TESTING
JESD22-A102D	ACCELERATED MOISTURE RESISTANCE - UNBIASED AUTOCLAVE
JESD22-A117C	ELECTRICALLY ERASABLE PROGRAMMABLE ROM (EEPROM) PROGRAM/ERASE ENDURANCE AND DATA RETENTION TEST
JESD22-A103D	HIGH TEMPERATURE STORAGE LIFE
JESD22-A118A	ACCELERATED MOISTURE RESISTANCE - UNBIASED HAST
JESD22-A106B	THERMAL SHOCK
JESD22-A107C	SALT ATMOSPHERE
JESD22-A109B	HERMETICITY
JESD22-A110D	HIGHLY ACCELERATED TEMPERATURE AND HUMIDITY STRESS TEST (HAST)
JESD22-A122	POWER CYCLING
JESD22-A101C	STEADY-STATE TEMPERATURE HUMIDITY BIAS LIFE TEST
JESD22-A120A	TEST METHOD FOR THE MEASUREMENT OF MOISTURE DIFFUSIVITY AND WATER SOLUBILITY IN ORGANIC MATERIALS USED IN INTEGRATED CIRCUITS:
JESD22-A119	LOW TEMPERATURE STORAGE LIFE
JESD22-A112-A	MOISTURE-INDUCED STRESS SENSITIVITY FOR PLASTIC SURFACE MOUNT DEVICES - SUPERSEDED BY J-STD-020A
JESD22-A121A	MEASURING WHISKER GROWTH ON TIN AND TIN ALLOY SURFACE FINISHES
JS-001-2012	JOINT JEDEC/ESDA STANDARD FOR ELECTROSTATIC DISCHARGE SENSITIVITY TEST - HUMAN BODY MODEL (HBM) - COMPONENT LEVEL
JESD22-A114F	ELECTROSTATIC DISCHARGE (ESD) SENSITIVITY TESTING HUMAN BODY MODEL (HBM)
JESD22-A105C	POWER AND TEMPERATURE CYCLING
JESD22-B103B	VIBRATION, VARIABLE FREQUENCY

## LIITE 3

### EN 60068 olosuhdetestausstandardi

EN 60068-2-1	Cold temperature
EN 60068-2-2	Dry heat
EN 60068-2-11	Salt mist
EN 60068-2-13	Low air pressure
EN 60068-2-14	Change of temperature
EN 60068-2-17	Sealing
EN 60068-2-18	Water
EN 60068-2-21	Robustness of terminations and integral mounting devices
EN 60068-2-27	Shock
EN 60068-2-29	Bump
EN 60068-2-30	Damp heat
EN 60068-2-31	Drop and tumble
EN 60068-2-32	Free fall
EN 60068-2-33	Change of temperature
EN 60068-2-38	Composite temperature/humidity cyclic test
EN 60068-2-39	Combined sequential cold, low air pressure and damp heat test
EN 60068-2-40	Combined cold/low air pressure tests
EN 60068-2-41	Combined dry heat/low air pressure tests
EN 60068-2-42	Sulphur dioxide test for contacts and connections
EN 60068-2-43	Hydrogen sulphide test for contacts and connections
EN 60068-2-44	Guidance on Test T. Soldering
EN 60068-2-45	Immersion in cleaning solvents
EN 60068-2-47	Mounting of components, equipment and other articles for vibration, impact and similar dynamic tests
EN 60068-2-48	Guidance on the application of the tests of IEC 60068 to simulate the effects of storage
EN 60068-2-5	Simulated solar radiation at ground level
EN 60068-2-50	Combined cold/vibration (sinusoidal) tests for both heat-dissipating and non-heat dissipating specimens
EN 60068-2-51	Combined dry heat/vibration (sinusoidal) tests for both heat-dissipating and non-heat-dissipating specimens
EN 60068-2-52	Salt mist cyclic (sodium chloride solution)
EN 60068-2-55	Bounce
EN 60068-2-57	Vibration. Time-history method
EN 60068-2-58	Test methods for solderability, resistance to dissolution of metallization and to soldering heat of surface mounting devices (SMD)
EN 60068-2-59	Vibration (sine-beat method)
EN 60068-2-6F	Vibration (sinusoidal)
EN 60068-2-60	Flowing mixed gas corrosion test
EN 60068-2-61	Climatic sequence
EN 60068-2-64	Vibration, broad-band random (digital control) and guidance

EN 60068-2-65	Vibration, acoustically induced
EN 60068-2-66	Damp heat, steady state (unsaturated pressurized vapor)
EN 60068-2-67	Damp heat, steady state, accelerated test primarily intended for components
EN 60068-2-68	Dust and sand
EN 60068-2-69	Solderability testing of electronic components for surface mount technology by the wetting balance method
EN 60068-2-7G	Acceleration, steady state
EN 60068-2-70	Abrasion of markings and letterings caused by rubbing of fingers and hands
EN 60068-2-74	Fluid contamination
EN 60068-2-75	Hammer tests
EN 60068-2-77	Body strength and impact shock
EN 60068-2-78	Damp heat, steady state
EN 60068-2-81	Shock. Shock response spectrum synthesis
EN 60068-2-9	Guidance for solar radiation testing
EN 60068-3-1	Cold and dry heat tests
EN 60068-3-2	Combined temperature/low air pressure tests
EN 60068-3-3	Guide to seismic test methods for equipment
EN 60068-3-4	Damp heat tests
EN 60068-3-5	Confirmation of the performance of temperature chambers
EN 60068-3-6	Confirmation of the performance of temperature/humidity chambers
EN 60068-3-7	Measurements in temperature chambers for tests A and B (with load)
EN 60068-3-8	Supporting documentation and guidance
EN 60068-4	Information for specification writers. Test summaries
EN 60068-5-2	Guide to drafting of test methods. Terms and definitions